

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФГАОУ ВПО «Российский государственный
профессионально-педагогический университет»

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА
РАСЧЕТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ПРИ ЛИТЬЕ ПОД РЕГУЛИРУЕМЫМ ДАВЛЕНИЕМ**

Монография

Екатеринбург
РГППУ
2013

УДК 621.74.043.3-531.8]:001.103:0044

ББК К616.32-64с5

А 22

Авторы: Ю. И. Категоренко, Б. С. Чуркин, А. Б. Чуркин,
М. В. Ведерников

Автоматизированная система расчета технологических параметров при литье под регулируемым давлением: монография / Ю. И. Категоренко [и др.]; под ред. Ю. И. Категоренко. Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2013. 104 с.

ISBN 978-5-8050-0509-2

Изложены базовые сведения о технологических особенностях основных разновидностей литья под регулируемым газовым давлением, приведены методы определения основных технологических параметров, даны методические указания по использованию компьютерной программы при определении технологических параметров изготовления отливок.

Монография адресована будущим специалистам в области литейного производства.

УДК 621.74.043.3-531.8]:001.103:0044

ББК К616.32-64с5

Рецензенты: профессор, кандидат технических наук В. С. Балин (ГОУ ВПО «Уральский государственный горный университет»); доцент, кандидат технических наук А. В. Песков (ФГАОУ ВПО «Российский государственный профессионально-педагогический университет»)

ISBN 978-5-8050-0509-2

© ФГАОУ ВПО «Российский
государственный профессионально-
педагогический университет», 2013

© Категоренко Ю. И., Чуркин Б. С.,
Чуркин А. Б., Ведерников М. В., 2013

Оглавление

Введение.....	5
Глава 1. Анализ процессов, происходящих при формировании отливок	7
1.1. Особенности способов литья под регулируемым давлением.....	7
1.2. Газодинамические процессы.....	12
1.2. Гидродинамические процессы.....	14
Глава 2. Автоматическое управление заливкой форм.....	23
Глава 3. Оптимальная продолжительность заливки формы сплавом.....	34
Глава 4. Литниково-питающие системы. Тепловые процессы.....	40
Глава 5. Требования к конструкции отливок. Особенности технологической оснастки	45
Глава 6. Особенности отдельных разновидностей литья под регулируемым давлением. Технологическое оборудование.....	54
Глава 7. Основные технологические параметры процесса. Последовательность разработки технологии.....	65
Глава 8. Автоматизированная система расчета технологических параметров	72
8.1. Последовательность определения параметров заполнения формы и формирования отливки.....	72
8.1.1. Анализ конструкции отливки.....	72
8.1.2. Определение характерных геометрических размеров отливки	74
8.1.3. Расчет продолжительности и скорости заливки полости формы	75
8.1.4. Расчет газодинамических параметров заливки форм.....	75
8.1.5. Расчет параметров системы при управлении процессом с помощью дросселирующих устройств.....	75
8.1.6. Выбор места подвода литниково-питающей системы и ее типы	75
8.1.7. Расчет параметров литниково-питающих систем.....	76
8.1.8. Расчет оптимальных параметров металлической формы для стабилизации ее теплового режима.....	77

8.1.9. Вывод данных на печать.....	78
8.1.10. Структура компьютерной программы	78
8.2. Эффективность применения системы автоматизированного расчета технологических параметров. Примеры расчетов	83
Заключение	94
Библиографический список.....	95
Приложение. Типы отливок	96

Введение

Развитие новой техники вызывает необходимость изготовления тонкостенных отливок сложной конфигурации с большими перепадами толщин стенок. Существующая технология кокильного литья часто не обеспечивает необходимой заполняемости форм, что предполагает большие технологические припуски. Это снижает коэффициент использования металла в заготовке и увеличивает трудоемкость механической обработки отливок. Вследствие объемного характера затвердевания многих современных высокопрочных алюминиевых литейных сплавов возникают большие затруднения в организации питания затвердевающей отливки, что приводит к повышению ее пористости и снижению эксплуатационных свойств.

Решение указанных вопросов невозможно без разработки и широкого внедрения современных прогрессивных способов изготовления отливок, среди которых важное место занимает литье под регулируемым газовым давлением (ЛРД), нашедшее в последнее время широкое применение в промышленности. Использование методов литья с регулируемым перепадом газового давления позволяет резко повысить эффективность производства, снизить материалоемкость литых заготовок и улучшить их эксплуатационные свойства.

В отличие от традиционных способов литья ЛРД дает возможность целенаправленно управлять движением сплава в процессе заполнения различных участков полости формы путем соответствующей организации изменения перепада газового давления на расплав в процессе заливки. Благодаря этому, а также лучшей заполняемости форм и повышенному силовому воздействию на формирующуюся отливку применение литья под регулируемым газовым давлением позволяет успешно получать отливки сложной конфигурации с минимальными технологическими припусками.

В литейном производстве находят применение следующие разновидности литья с использованием регулируемого газового давления: литье под низким давлением (ЛНД), литье вакуумным всасыванием (ЛВВ), литье с противодавлением (ЛПрД) и различные их комбинации. Несмотря на различия в реализации процесса, принципиально общим для этих способов является заполнение форм сплавом под действием изменяющегося по некоторому закону перепада газового давления на расплав. Это позволяет разработать единую теорию литья под регулируемым газовым давлением.

Принципы указанных разновидностей ЛРД достаточно подробно изложены в литературе [1–5].

За последнее десятилетие достигнуты значительные успехи в разработке технологического оборудования, теоретических и технологических вопросов рассматриваемых способов литья. Следует отметить работы В. К. Беделя, Н. Н. Белоусова, Г. П. Борисова, Э. Ч. Гини, В. А. Косинцева, Б. М. Ксенофонтова, В. Н. Майорова, А. А. Рыжикова, Н. Ф. Рыжкова, Ю. А. Степанова, Г. И. Тимофеева, Б. С. Чуркина и др. Однако исследования отдельных разновидностей литья под регулируемым газовым давлением проводились, как правило, изолированно. Это привело к тому, что различные способы литья разработаны в неодинаковой степени. Наибольшие успехи достигнуты в области разработки технологии и оборудования литья под низким давлением. Вместе с тем разработка литья вакуумным всасыванием, особенно в области создания серийного оборудования и внедрения способа в производство, характеризуется значительно меньшими успехами.

Дальнейшее развитие литья под регулируемым газовым давлением требует создания его обобщенной теории и определения эффективных областей применения его разновидностей.

Широкое внедрение рассматриваемых способов литья в производство требует специально обученных рабочих кадров. Условия работы технологического оборудования, методы управления процессами при литье под регулируемым давлением иные, чем при традиционном кокильном литье. Поэтому знание теоретических и технологических основ данных способов литья необходимо как для инженеров-технологов, так и в особенности для инженеров-педагогов, осуществляющих теоретическое и производственное обучение рабочих, изготавливающих отливки на различных установках литья под регулируемым газовым давлением.

В данной монографии использованы результаты исследований авторов, приведены оригинальные методики технологических расчетов и управления процессом изготовления отливок, а также учтен производственный опыт.

Монография может быть использована при подготовке будущих специалистов в области литейного производства, а также в технологической и конструкторской работе, связанной с литьем под регулируемым газовым давлением.

Глава 1. АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ОТЛИВОК

1.1. Особенности способов литья под регулируемым давлением

Основным признаком способов литья под регулируемым давлением является заполнение формы сплавом под действием изменяющегося по некоторому закону перепада газового давления. В отличие от традиционных способов литья ЛРД позволяет целенаправленно управлять движением сплава в процессе заполнения различных участков полости формы. Это происходит путем соответствующей организации изменения перепада газового давления на расплав в процессе заливки. Значение перепада давлений в процессе заливки зависит от плотности сплава и высоты отливки и не превышает при литье алюминиевых сплавов 0,02 МПа. После заполнения формы перепад давлений увеличивают до 0,1–0,15 МПа. При этом улучшаются условия питания отливки и увеличивается скорость кристаллизации сплава, что повышает плотность отливки и ее механические свойства.

В настоящее время применяются следующие разновидности литья под регулируемым давлением: литье под низким давлением, литье вакуумным всасыванием и литье с противодавлением. Их различия состоят в способах создания перепада газового давления, в уровне газового давления и в условиях вентиляции формы в процессе ее заполнения сплавом. Технологические схемы указанных разновидностей ЛРД приведены на рис. 1–3.

При литье под низким давлением (см. рис. 1) тигель с расплавом 1 помещен в нижнюю герметизированную камеру 2. Форма 5 расположена сверху на плите 4 и через литниковую систему 6 соединена с металлопроводом 3, опущенным в тигель с расплавом.

При достаточной вентиляции полости формы с помощью вентиляционных каналов 7 давление в полости формы $P_{\text{ф}}$ в процессе заливки равно атмосферному давлению $P_{\text{а}}$, т. е. $P_{\text{ф}} = P_{\text{а}}$. Перед заливкой формы давление в камере машины $P_{\text{к}}$ также равно $P_{\text{а}}$. Для осуществления заливки из ресивера или магистрали в камеру подается воздух, что создает нарастающее во времени избыточное давление на расплав в тигле. Под действием пере-

пада давлений $\Delta P_k(t) = P_k(t) - P_{\phi}$ происходит заполнение полости формы. Установки для ЛНД рассчитаны на избыточное давление до 0,1 МПа.

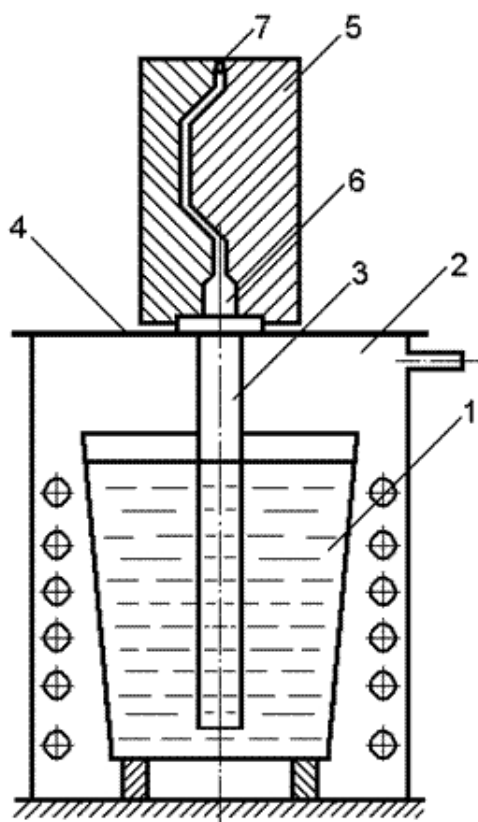


Рис. 1. Схема установки для литья под низким давлением:

1 – тигель с расплавом; 2 – камера; 3 – металлопровод; 4 – плита; 5 – форма;
6 – литниковая система; 7 – вентиляционные каналы

В установках для литья вакуумным всасыванием (см. рис. 2) форма 1 помещается в герметизированную вакуумную камеру 3, расположенную на плите 4. Полость формы через литниковую систему 5 соединена с металлопроводом 6, который опущен в тигель с расплавом 7. Тигель открыт, и давление на расплав в нем равно атмосферному давлению. Вакуумная камера соединена вакуумпроводом с ресивером 8. Для управления кинетикой создания разрежения в камере в вакуумную систему включено дросселирующее устройство 9. Разрежение в ресивере чаще всего поддерживается на уровне 0,0665 МПа.

Перед заливкой формы давление в камере и полости формы равно атмосферному давлению. В процессе заливки в камере создается нарастающее во времени разрежение. При эффективной вентиляции полости формы через вентиляционные каналы 2 разрежение в полости формы практически равно

разрежению в камере. Заполнение формы осуществляется под действием нарастающего во времени перепада давлений $\Delta P_k(t) = P_a - P_\phi(t)$.

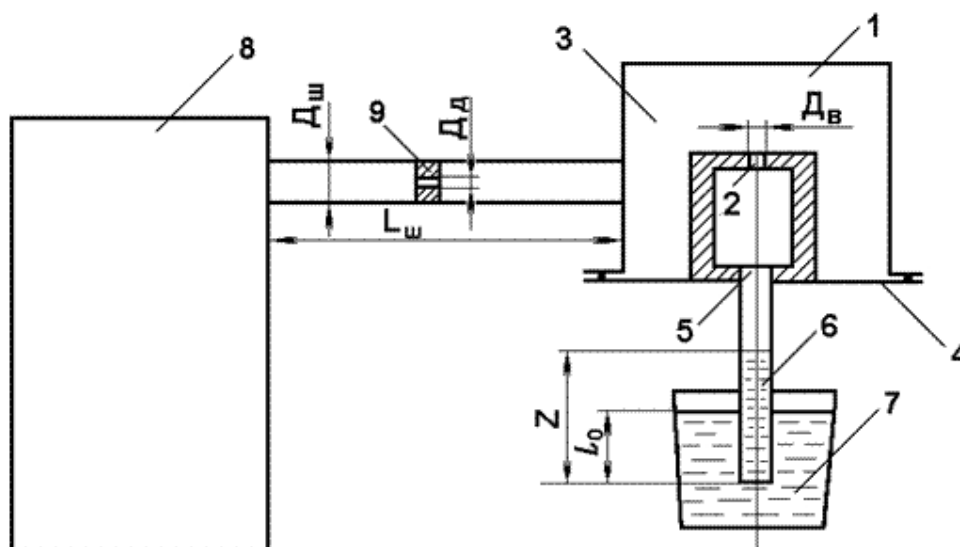


Рис. 2. Схема установки для литья вакуумным всасыванием:

1 – форма; 2 – вентиляционные каналы; 3 – вакуумная камера; 4 – плита;
5 – литниковая система; 6 – металлопровод; 7 – тигель с расплавом; 8 – ресивер;
9 – дросселирующее устройство

На рис. 3 приведена схема установки для литья с противодавлением. Установка имеет две герметизированные камеры: нижнюю 1, в которую помещен тигель с расплавом 6, и верхнюю 3, в которую помещена форма 5. Полость формы соединена с металлопроводом. Камеры соединены друг с другом трубопроводом с краном. Верхняя камера через дроссель 2 и кран может быть соединена с атмосферой.

В начальный момент литейного цикла кран на соединительном воздухопроводе открыт и в камеры из магистрали подается воздух. В обеих камерах создается давление P_n . Затем кран закрывается и камеры разъединяются. В начале заливки давление в обеих камерах одинаковое, равное P_n . После открывания крана начинается истечение воздуха через дросселирующее устройство из верхней камеры, а следовательно, и из полости формы, приводящее к уменьшению давления в полости формы P_ϕ и созданию возрастающего во времени перепада давлений на расплав, который обеспечивает заполнение формы:

$$\Delta P_k(t) = P_n - P_\phi(t).$$

Выпускаемые в Болгарии установки ЛПрД рассчитаны на величину давления P_n до 2,5 МПа, чаще всего $P_n = 0,5$ МПа.

По существу, ЛПрД синтезирует разработанный в 1943 г. А. А. Бочваром и А. Г. Спасским метод автоклавного литья и способ литья вакуумным всасыванием.

Из рассмотренных способов ЛРД наибольшее применение получил способ литья под низким давлением. Это обусловлено тем, что при ЛНД форма открыта и для механизации ее обслуживания при любой плоскости разъема формы можно использовать устройства, освоенные в установках для кокильного литья. Кроме того, отсутствие камеры, в которой находится форма, позволяет применять поршневое воздействие на кристаллизующийся расплав после заливки формы.

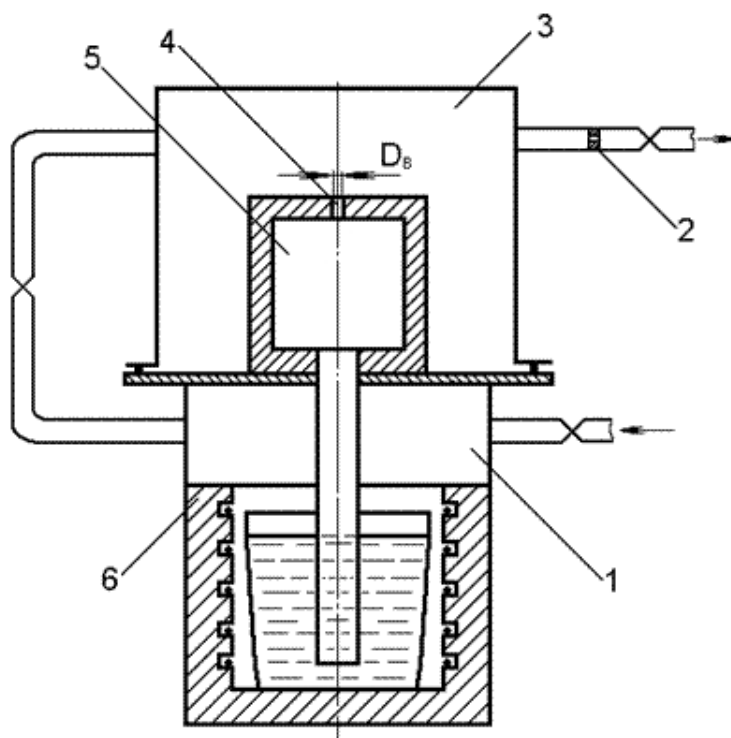


Рис. 3. Схема установки для литья с противодавлением:

1 – нижняя камера; 2 – дросселирующее устройство; 3 – верхняя камера;
4 – вентиляционные каналы; 5 – полость формы; 6 – тигель с расплавом

Однако при изготовлении тонкостенных отливок, когда требуются большие скорости заливки, из-за высокой плотности воздуха в форме практически невозможно обеспечить эффективную вентиляцию полости формы. Это увеличивает противодавление в ней и снижает заполняемость форм.

Применение повышенного всестороннего газового давления при ЛПрД позволяет существенно увеличить эффективность суспензионного питания отливок и резко снизить усадочную и газовую пористость в отливках из высокопрочных широкоинтервальных сплавов.

При литье вакуумным всасыванием, в разработку которого большой вклад внесли отечественные ученые (способ был запатентован в России в 1913 г.), создаются наиболее благоприятные условия для получения тонкостенных отливок из-за снятия противодействия в полости формы при вакуумировании. Поэтому в настоящее время ЛВВ – один из основных способов получения ювелирных и стоматологических отливок. Так как формирование отливок происходит в условиях разрежения, отливки, полученные при ЛВВ, при прочих равных условиях имеют более высокий уровень механических свойств, чем отливки, полученные при ЛНД.

С учетом особенностей отдельных разновидностей ЛРД можно отметить общие для них преимущества, обусловившие их широкое применение:

1. Возможность управления характером движения сплава при заполнении отдельных участков полости формы позволяет изготавливать качественные отливки сложной конфигурации со значительными перепадами толщин стенок без применения технологических напусков. При этом до 80 % и более повышается коэффициент использования металла в заготовке и резко снижается трудоемкость механической обработки отливок.

2. Действие возрастающего перепада давлений обеспечивает увеличение заполняемости форм сплавом, что позволяет получать отливки с тонкостенными элементами. На 1–2 класса повышается точность размеров и массы отливок по сравнению с отливками, полученными кокильным литьем, и в 1,5–2 раза снижаются припуски на механическую обработку отливок.

3. Возможность осуществлять питание затвердевающей отливки расплавом из тигля через металлопровод и литниковую систему с последующим сливом незатвердевшего металла позволяет во многих случаях обойтись без применения прибылей и повысить выход годного до 90 % и более. При этом на 30–50 % снижается потребность в жидком металле.

4. В результате действия повышенного перепада давлений на затвердевающий сплав увеличивается скорость затвердевания и усиливается суспензионное и фильтрационное питание отливки. При этом на 20–40 % повышаются прочностные характеристики сплава в отливке и на 50–100 % –

пластические свойства. В 1,5–2 раза увеличивается производительность благодаря сокращению общего цикла получения отливок.

5. Возможны полная механизация и автоматизация процесса. Существенно повышается экологическая чистота технологии за счет герметизации формы и расплава.

Можно рекомендовать следующие области наиболее эффективного применения указанных способов литья. Литье вакуумным всасыванием целесообразно применять при изготовлении отливок сложной конфигурации с толщиной стенок 1–5 мм и с повышенными требованиями к механическим свойствам. Литье под низким давлением эффективнее литья в кокиль при изготовлении отливок сложной конфигурации с толщиной стенки более 3–5 мм. Для получения ответственных отливок из высокопрочных широкоинтервальных сплавов следует применять литье с противодействием.

1.2. Газодинамические процессы

Особое управляющее воздействие на качество отливок, изготавливаемых способами ЛРД, оказывают газодинамические процессы. При ЛВВ и ЛПрД управление заливкой форм осуществляется с помощью встроенных в газовую сеть дросселирующих устройств. При разрежении в ресивере, равном 0,0655 МПа (ЛВВ), и давлении в камере P_n до 0,5 МПа (ЛПрД) истечение воздуха из камеры в ресивер (ЛВВ) или в атмосферу (ЛПрД) происходит в докритическом адиабатическом режиме. При этом разрежение в камере машины ЛВВ изменяется по аperiодическому закону

$$\Delta P_k = P_a - P_k = (P_a - P_p) \cdot (1 - \exp(-\beta t)), \quad (1)$$

где $(P_a - P_p)$ – разрежение в ресивере, Па;
 β – газодинамический коэффициент.

$$\beta = 61152 \cdot \omega_d \frac{T_k^{0,5}}{(P_a - P_p)^{0,79} \cdot V_k}, \quad (2)$$

где ω_d – площадь проходного сечения дросселирующего устройства, м²;
 V_k – объем камеры, м³;
 T_k – температура воздуха в камере, К.

При литье с противодавлением перепад давлений, который действует на расплав, изменяется в процессе заливки по закону

$$\Delta P_{\kappa} = P_{\text{н}} - P_{\kappa} = (P_{\text{н}} - P_{\text{а}}) \cdot (1 - \exp(-\beta t)). \quad (3)$$

$$\beta = 885,2 \cdot \omega_{\text{д}}^{1,063} \frac{T_{\kappa}^{0,5}}{(P_{\text{н}} - P_{\text{а}})^{0,303} \cdot V_{\kappa}}, \quad (4)$$

где $(P_{\text{н}} - P_{\text{а}})$ – избыточное давление в нижней камере, Па;

V_{κ} – объем верхней камеры, м³.

Формулы (1) – (4) справедливы, если выполняется условие

$$V_{\kappa} > 10 V_{\text{ф}},$$

где $V_{\text{ф}}$ – объем, занятый литейной формой, м³.

Это позволяет пренебречь изменением объема воздуха в камере при заполнении формы сплавом. Если данное условие не выполняется, то процесс становится трудноуправляемым. Это происходит из-за влияния гидродинамических параметров заполнения полости формы сплавом на газодинамические процессы. Так как на практике $\beta t \ll 1$, зависимости (1) и (3) можно с достаточной точностью аппроксимировать следующими линейными функциями:

- для ЛБВ:

$$\Delta P_{\kappa} = (P_{\text{а}} - P_{\text{р}}) \beta t; \quad (5)$$

- для ЛПрД:

$$\Delta P_{\kappa} = (P_{\text{н}} - P_{\text{а}}) \beta t. \quad (6)$$

В современных машинах литья под низким давлением предусмотрено применение автоматических устройств, обеспечивающих изменение избыточного давления в камере машины по линейному закону

$$\Delta P_{\kappa} = (P_{\kappa} - P_{\text{а}}) = mt, \quad (7)$$

где m – постоянный темп изменения избыточного давления в камере машины при заливке формы, обеспечиваемый соответствующей настройкой автомата, Па/с.

При недостаточной вентиляции формы давление воздуха в полости формы P_{ϕ} может существенно отличаться от давления в камере P_k (ЛБВ и ЛПрД) или атмосферного давления (ЛНД). Это сильно затруднит организацию оптимального управления заливкой форм сплавом, так как в системе могут возникнуть недопустимые колебания давления. Для исключения этих явлений суммарная площадь поперечного сечения вентиляционных каналов должна быть не менее минимально допустимой величины $\omega_{в.к}$, при которой давление воздуха в полости формы и давление в окружающем ее пространстве практически совпадают. Для расчета $\omega_{в.к}$ можно применить следующие формулы:

- для ЛБВ:

$$\omega_{в.к} = (P_a - P_p) \cdot \beta \frac{\omega_{\phi}}{31,8\rho \cdot g}; \quad (8)$$

- для ЛНД:

$$\omega_{в.к} = m \frac{\omega_{\phi}}{30,2\rho \cdot g}; \quad (9)$$

- для ЛПр:

$$\omega_{в.к} = (P_n - P_a) \beta \frac{\omega_{\phi} \cdot (P_n / P_a)^{0,5}}{31,8\rho \cdot g}, \quad (10)$$

где $\omega_{в.к}$ – суммарная площадь поперечных сечений вентиляционных каналов, см^2 ;

ω_{ϕ} – наибольшая площадь поперечного сечения отливки, см^2 ;

ρ – плотность сплава, кг/м^3 ;

g – ускорение свободного падения, $g = 9,8 \text{ м/с}^2$.

1.2. Гидродинамические процессы

При традиционных способах литья отсутствует возможность управления действующим на расплав гидростатическим напором в процессе заливки формы. Поэтому при расчете литниковых систем применяют уравнение Бернулли для установившегося движения жидкости.

При литье под регулируемым давлением заполнение формы сплавом осуществляется под действием изменяющегося по некоторому закону перепада давлений $\Delta P_k(t)$ (рис. 4). Поэтому для описания кинетики движения сплава при заполнении металлопровода и отдельных элементов полости формы при ЛРД применяют уравнение Бернулли для неустановившегося движения жидкости. В обобщенном виде это уравнение имеет вид

$$\frac{dv}{dt} = \frac{g}{L_{\text{пр}}} \left(h_p - h - \frac{v^2}{2g} - h_{\text{пот}} \right),$$

где v – средняя скорость движения свободной поверхности сплава, м/с;
 $L_{\text{пр}}$ – приведенная длина потока в системе, м;
 h_p – разность действующих на расплав пьезометрических напоров, м;
 $h_p = \frac{\Delta P_k(t)}{\rho g}$;
 $h_{\text{пот}}$ – гидравлические потери напора, м;
 h – уровень сплава в тигле, м.

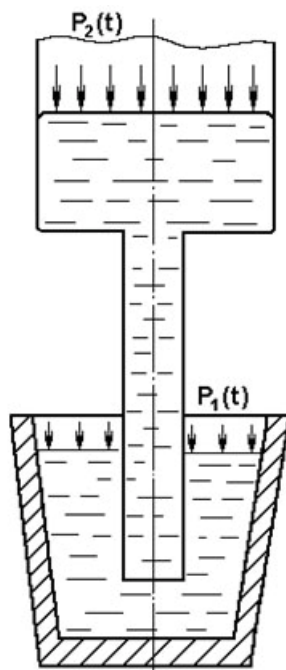


Рис. 4. Схема гидравлической системы при ЛРД

При заполнении металлопровода и полости формы на расплав действуют направленная вверх разность пьезометрических напоров h_p и направленный вниз гидростатический напор h (см. рис. 4). Если $h < h_p$, то ускорение dv/dt положительное и скорость сплава увеличивается, что приводит к бы-

тому росту h . При $h > h_p$ ускорение отрицательное и скорость сплава уменьшается. В результате скорость сплава v совершает колебания относительно скорости изменения разности пьезометрических напоров $v_p = \frac{d\Delta P(t)}{dt} \cdot \frac{1}{\rho \cdot g}$, а уровень сплава h колеблется относительно h_p (рис. 5).

При ЛВВ

$$v_p = \beta \frac{P_a - P_p}{\rho g}.$$

При ЛПрД

$$v_p = \beta \frac{P_n - P_a}{\rho g}.$$

При ЛНД

$$v_p = \frac{m}{\rho g}.$$

В конце заполнения металлопровода колебания скорости практически сглаживаются. Характер движения сплава при заполнении полости формы определяется наличием участков сужения и расширения поперечных сечений отливки. На этих участках скорость сплава изменяется обратно пропорционально отношению площадей верхнего и нижнего участков:

$$v_{i+1} = \frac{v_i \cdot \omega_i}{\omega_{i+1}},$$

где v_{i+1} и v_i – скорости сплава на верхнем и нижнем участках, м/с;
 ω_{i+1} и ω_i – площади сечений верхнего и нижнего участков, м².

В качестве критерия, характеризующего возмущающее действие изменений сечений потока, примем абсолютную величину максимальных отклонений скорости сплава v от величины v_p

$$\varepsilon_v = \frac{|v - v_p|}{v_p} \cdot 100\%.$$

При расширении потока скорость сплава уменьшается, и при постоянном значении v_p ε_v увеличивается в тем большей степени, чем больше ω_{i+1}/ω_i и v_p . При этом сначала происходит свободное фонтанирование сплава в открытое пространство, а затем истечение под затопленный уровень.

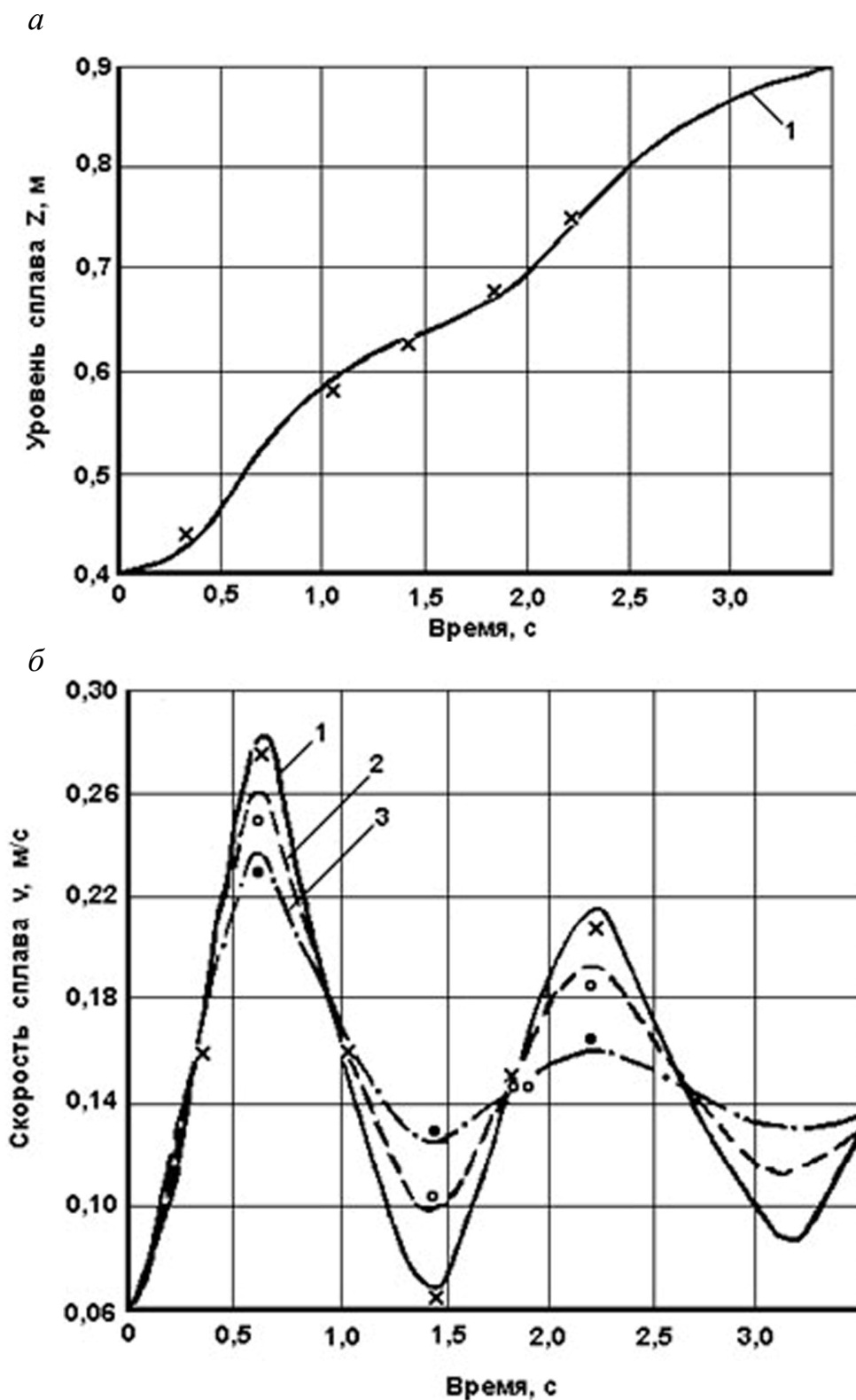


Рис. 5. Характер изменения уровня (*а*) и скорости (*б*) при заполнении металлопровода сплавом АК7ч:

1 – расчетные данные при коэффициенте потерь напора на входе в металлопровод $\zeta_{вх} = 1$; 2 – расчетные данные при $\zeta_{вх} = 3$; 3 – расчетные данные при $\zeta_{вх} = 6$

На рис. 6 показан характер линий тока сплава при заполнении формы на участке расширения потока. Интенсивность вихревого движения сплава в периферийных застойных зонах и конфигурация свободной поверхности сплава в форме зависят от отношения площадей ω_{i+1}/ω_i и значения v_p . Установлено, что если принятое значение v_p превышает некоторое критическое значение $(v_p)_{кр}$, то у свободной поверхности сплава возникают поперечные вихревые зоны (см. рис. 6, б), вызывающие разрыв окисной пленки на поверхности алюминиевого сплава и замешивание ее в расплав. Это приводит к браку отливок по пленам. Поэтому должно соблюдаться условие $v_p < (v_p)_{кр}$. Если его выполнить не удастся, то нужно оптимизировать закон изменения перепада давлений на расплав $\Delta P_k(t)$ (см. ниже). Зависимость $(v_p)_{кр}$ от отношения площадей ω_{i+1}/ω_i отражена на рис. 7.

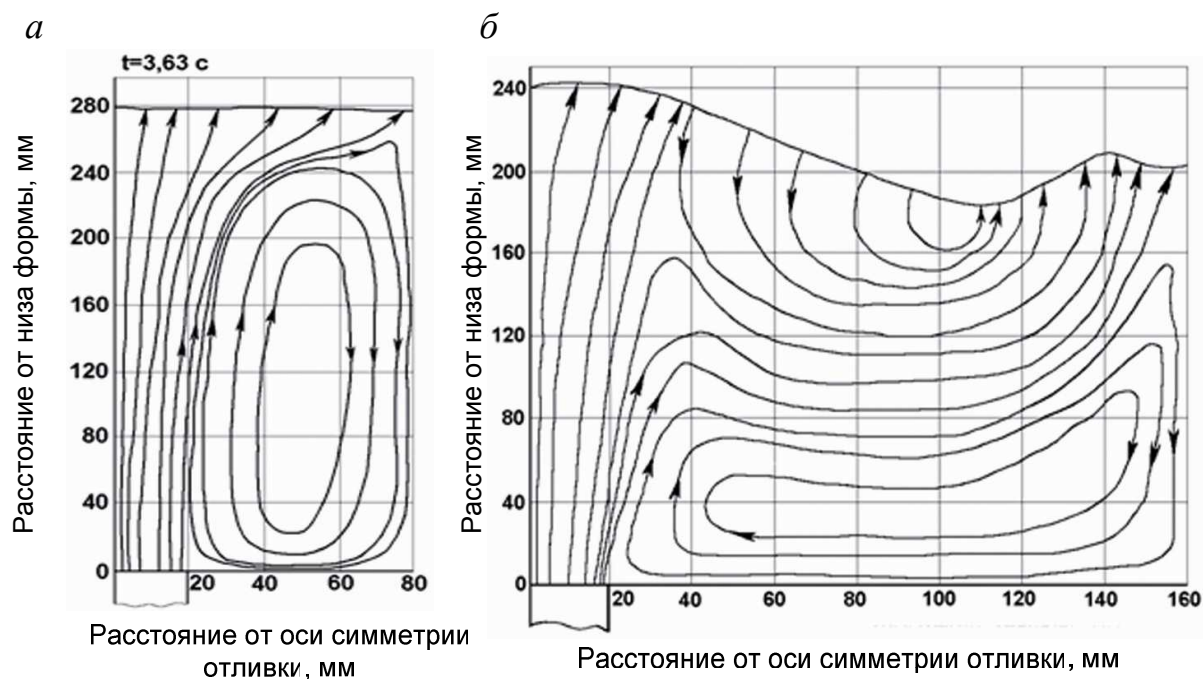


Рис. 6. Характер линий тока в процессе заполнения полости формы сплавом АК7ч при ЛНД:

$$a - \omega_{\phi}/\omega_m = 4, v_p = 8 \text{ см/с}; \quad б - \omega_{\phi}/\omega_m = 8; v_p = 16 \text{ см/с}$$

При сужении потока скорость сплава увеличивается и рост его уровня h опережает рост разности пьезометрических напоров h_p . Установлено, что при $\omega_{i+1}/\omega_i < 0,6$ качественное заполнение формы обеспечить невозможно при любом постоянном значении v_p . При $v_p < 5 \text{ см/с}$ в процессе заливки происходят колебания уровня сплава, приводящие к образованию по высоте отливки периодически расположенных спаев (рис. 8).

При бóльших значениях v_p колебания уровня сплава возникают в конце заливки формы вследствие гидравлического удара.

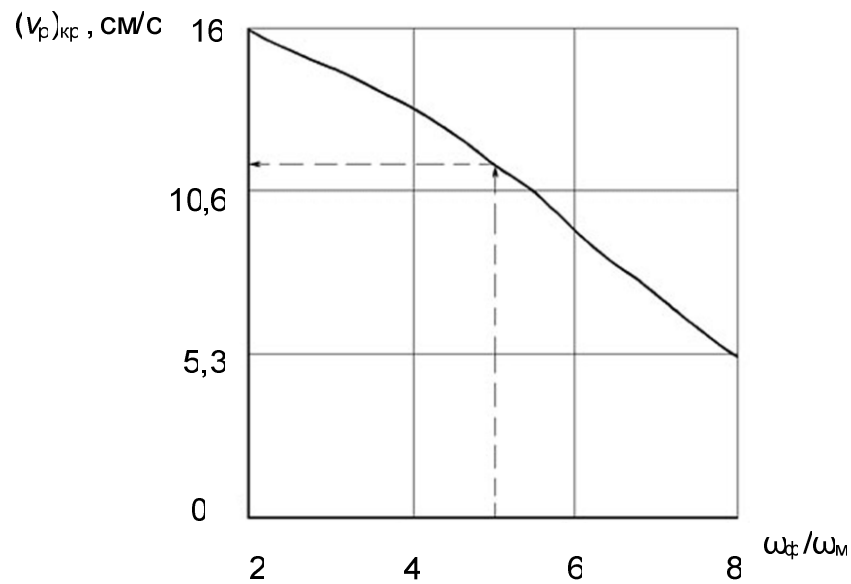


Рис. 7. Зависимость $(v_p)_{кр}$ от отношения площадей ω_{i+1}/ω_i

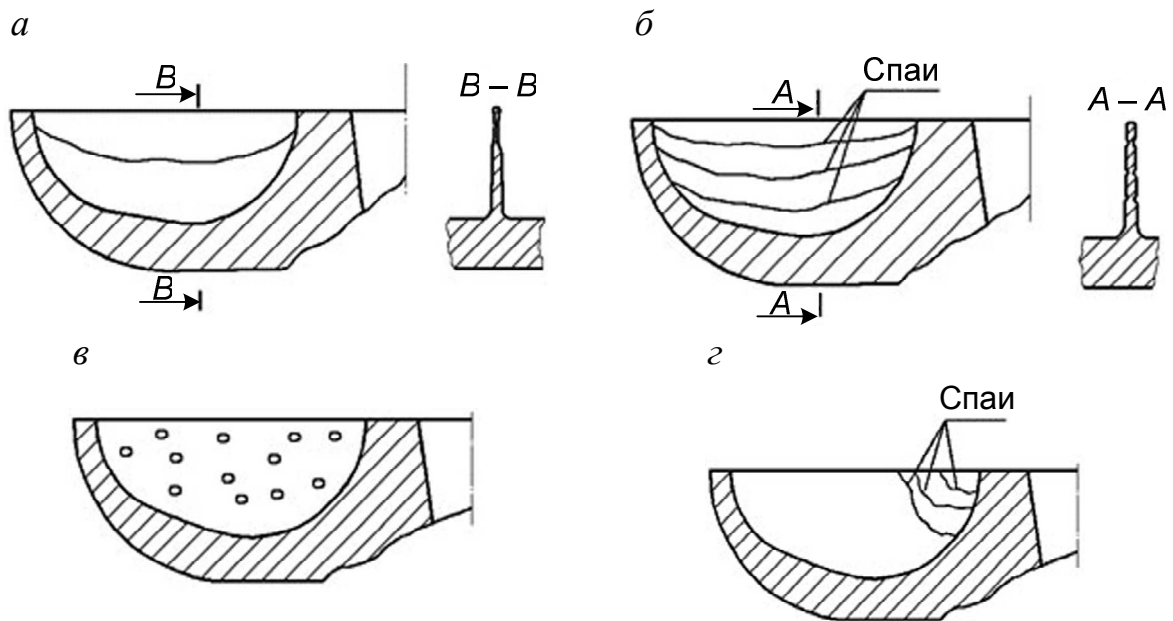


Рис. 8. Виды дефектов отливок, вызванных некачественным заполнением форм сплавом:

$a, б$ – спаи; $в$ – недолив; $г$ – газовые несплошности

Как показал анализ экспериментальных и производственных данных, качественное заполнение форм сплавом обеспечивается, если значение критерия ε_v не превышает 10 %.

Организация управления заливкой форм при ЛРД характеризуется тем, что заполнение формы сплавом в случае ЛВВ и ЛПрД осуществляется при некотором постоянном для данной формы значении газодинамического коэффициента β (при соответствующем фиксированном значении площади проходного сечения дросселирующего устройства), а в случае ЛНД – при постоянном значении m . В этих условиях заливка формы осуществляется при практически постоянных значениях v_p . Качественное заполнение формы обеспечивается лишь для ограниченной номенклатуры отливок при $6 < \frac{\omega_{i+1}}{\omega_i} < 6$ и $v_p < 10$ см/с.

Для расширения сферы применения способов ЛРД необходимо осуществлять изменение перепада давлений на расплав ΔP_p в процессе заливки по некоторому оптимальному закону, учитывающему конфигурационные особенности отливки.

Относительно просто можно осуществить изменение перепада давлений в соответствии с кусочно-линейной функцией. При анализе конфигурации отливки нужно выделить все участки резкого расширения или сужения поперечных сечений.

Для того чтобы минимизировать отклонения скорости сплава v от значений v_p , необходимо в моменты перехода сплава через участки сужения и расширения потока соответствующим образом изменять темп нарастания перепада давлений, т. е. так изменять значения скорости v_p , чтобы они были близки к скоростям движения сплава при заполнении соответствующих участков полости формы. В месте расширения потока, если $v_p > (v_p)_{кр}$, следует снизить v_p и расширенную часть полости формы заполнять при уменьшенных значениях коэффициента β или m . Значения этих коэффициентов можно вычислить по формулам

$$\beta_{i+1} = \beta_i K \frac{\omega_i}{\omega_{i+1}}, \quad (11)$$

$$m_{i+1} = m_i K \frac{\omega_i}{\omega_{i+1}}, \quad (12)$$

где β_{i+1} , β_i , m_{i+1} , m_i – значения коэффициентов β (для ЛВВ и ЛПрД) и m (для ЛНД) при заполнении верхней и нижней частей полости формы при расширении потока;

K – поправочный коэффициент, учитывающий влияние условий растекания сплава при расширении потока. Значения коэффициента K приведены в таблице.

Зависимость коэффициента K от отношения площадей ω_{i+1}/ω_i и значений коэффициентов β_{i+1} и m_{i+1}

ω_{i+1}/ω_i	Значения коэффициентов $\beta_{i+1}, \text{с}^{-1}$ (для ЛВВ и ЛПрД) и $m_{i+1}, \text{Па/с}$ (для ЛНД)				
	0,010 (ЛВВ) 665 (ЛНД) $\frac{665}{P_{\text{н}} - P_{\text{а}}}$ (ЛПрД)	0,015 (ЛВВ) 998 (ЛНД) $\frac{998}{P_{\text{н}} - P_{\text{а}}}$ (ЛПрД)	0,020 ЛВВ 1330 ЛНД $\frac{1330}{P_{\text{н}} - P_{\text{а}}}$ (ЛПрД)	0,025 ЛВВ 1663 ЛНД $\frac{1663}{P_{\text{н}} - P_{\text{а}}}$ (ЛПрД)	0,030 ЛВВ 1995 ЛНД $\frac{1995}{P_{\text{н}} - P_{\text{а}}}$ (ЛПрД)
2	2,34	1,78	1,25	1,20	1,10
4	2,83	1,95	1,60	1,20	1,10
6	3,10	2,40	1,92	1,50	1,10
8	3,20	2,50	2,30	2,25	2,20

В случае резкого сужения сечений при $\omega_{i+1}/\omega_i < 0,6$ нижний элемент полости формы следует заполнять при меньших значениях коэффициента β или m , которые можно рассчитать по формулам

$$\beta_i = \beta_{i+1} \cdot \frac{\omega_{i+1}}{\omega_i}; \quad (13)$$

$$m_i = m_{i+1} \cdot \frac{\omega_{i+1}}{\omega_i}. \quad (14)$$

Как показано на рис. 9, а, при заполнении формы с постоянным темпом изменения перепада давлений, т. е. при одинаковых значениях газодинамического коэффициента β для всех участков ($\beta_{\text{м}} = \beta_{\text{н}} = \beta_{\text{в}} = 0,04 \text{ с}^{-1}$), имеют место большие отклонения скорости сплава v от значений $v_{\text{р}}$, что приводит к интенсивному фонтанированию сплава и образованию дефектов в отливках.

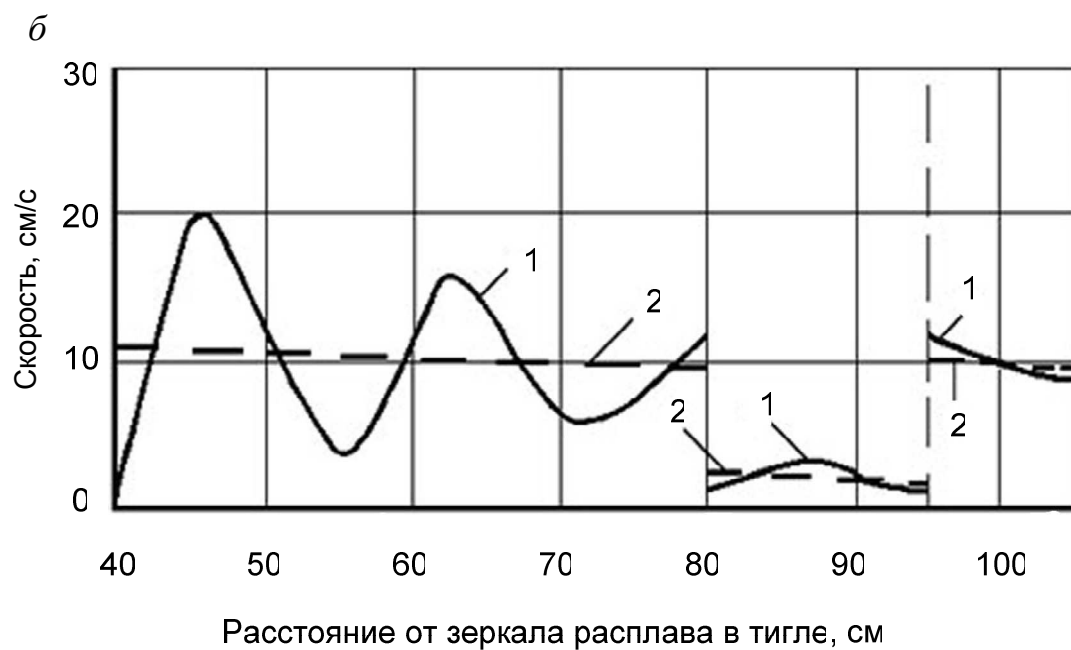
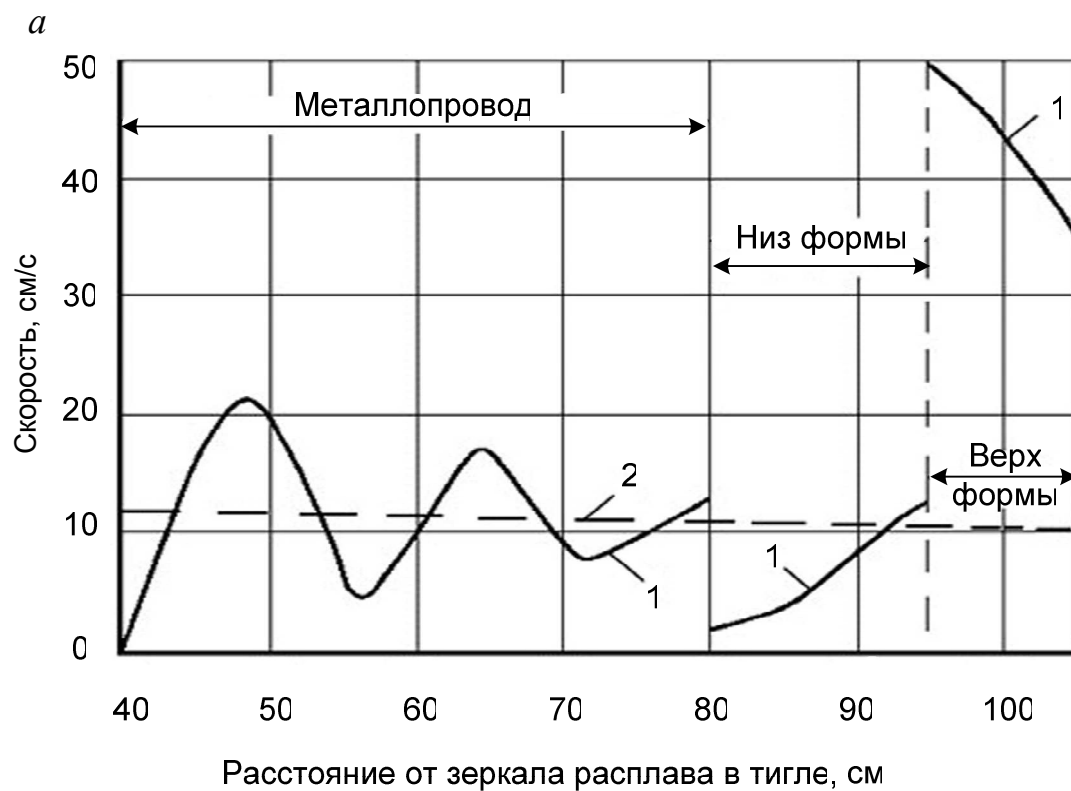


Рис. 9. Характер изменения скорости сплава при заполнении металлопровода, нижней и верхней части формы алюминиевым сплавом в условиях ЛВВ при неизменном значении коэффициента β (*a*) и при оптимальном управлении (*б*):

$1 - v$; $2 - v_p$

На рис. 9, б приведены данные, полученные при оптимальном управлении заливкой, когда заполнение металлопровода, нижней и верхней частей формы проводилось при различных значениях коэффициента β , рассчитанных по приведенным выше формулам ($\beta_m = 0,037 \text{ с}^{-1}$, $\beta_n = 0,011 \text{ с}^{-1}$ и $\beta_b = 0,04 \text{ с}^{-1}$). Значения критерия ε_v при этом не превышают 10 %, и обеспечивается плавное, качественное заполнение формы. Данный метод управления заливкой форм позволяет получать качественные отливки при отношениях площадей сечений от 0,1 до 10 и скоростях заливки до 20 см/с. Его целесообразно применять, если необходимые исходя из обеспечения заполняемости формы значения скорости v превышают критические значения $v_{кр}$ и если в конструкции отливки есть участки сужения сечений при $\omega_b/\omega_n < 0,6$. В остальных случаях можно осуществлять заливку формы при неизменных значениях газодинамических параметров.

Глава 2. АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЗАЛИВКОЙ ФОРМ

На рис. 10 приведены схемы газовой сети в системе оптимального автоматического управления заливкой форм при ЛВВ и ЛПрД. Система представляет собой несколько параллельно встроенных в газовую сеть дросселей (диафрагм) с разными проходными сечениями, которые автоматически подключаются к системе в соответствующие моменты времени. Настройка данной системы предполагает определение площадей проходных сечений диафрагм, обеспечивающих при истечении воздуха через них изменение разрежения или избыточного давления в камере машины с рекомендованными значениями газодинамического коэффициента β , а также расчет времени включения в систему той или иной диафрагмы. Переключение диафрагм осуществляется автоматически с помощью реле времени.

Определение значений площадей проходных сечений диафрагм для заполнения формы на различных участках ω_{di} по соответствующим значениям газодинамического коэффициента выполняется по следующим формулам:

- для литья вакуумным всасыванием:

$$\omega_{di} = \beta_i (P_a - P_p)^{0,79} \frac{V_k}{1,33}, \quad (15)$$

где ω_{di} — площадь проходного сечения диафрагмы при заполнении i -го участка полости формы, мм^2 ;

- для литья с противодавлением:

$$\omega_{di} = (\beta_i \cdot V_k)^{0,94} \frac{(P_n - P_a)^{0,285}}{0,0108}. \quad (16)$$

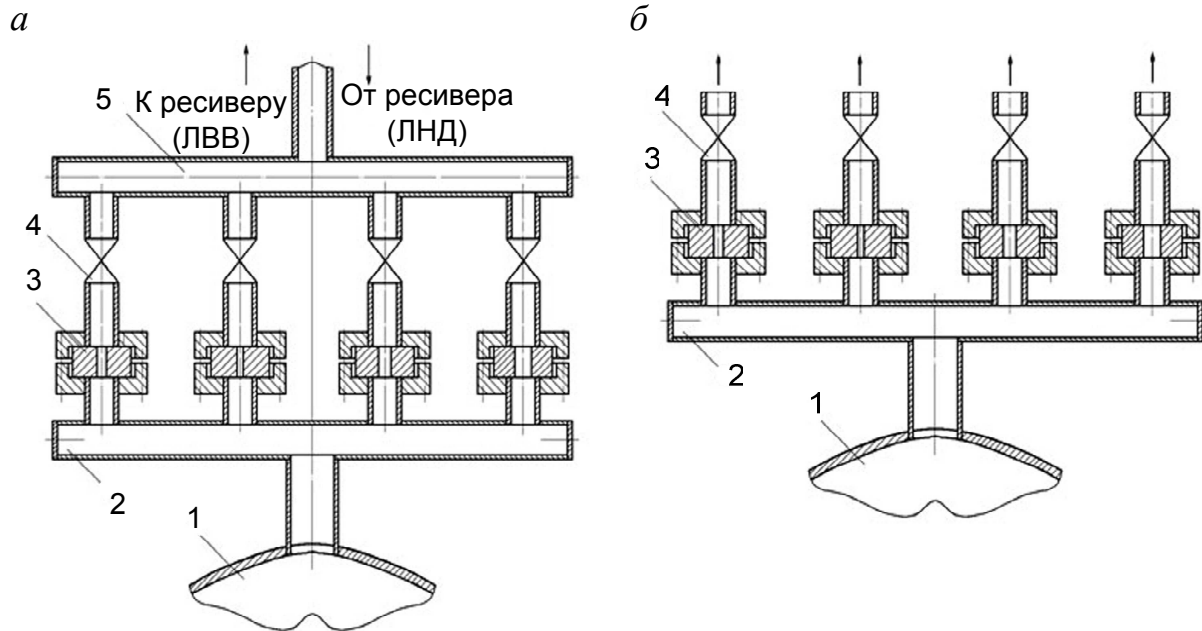


Рис. 10. Схемы газовой сети в системе оптимального управления заливкой форм при ЛВВ (а) и ЛПрД (б):

1 – вакуумная камера; 2 – входной коллектор; 3 – диафрагма;
4 – кран; 5 – выходной коллектор

С целью обеспечения дискретного изменения темпа нарастания избыточного давления в камере машины литья под низким давлением применяемые на современных установках автоматические устройства для управления заливкой форм необходимо модернизировать, предусмотрев возможность автоматического безынерционного изменения параметра настройки m в соответствующие моменты времени в процессе заливки формы.

При значениях величины ε_v , не превышающих 10 %, с достаточной для практики точностью уровень сплава в полости формы можно определять по формуле

$$h = h_p = \frac{\Delta P_k(t)}{\rho g}. \quad (17)$$

Используя (1), (3), (7) и (17), можно получить формулы для расчета продолжительности заполнения металлопровода и отдельных участков полости формы.

При *литье под низким давлением* продолжительность заполнения металлопровода равна

$$t_m = M_m (Z_m - l_0) \frac{\rho g}{m_m}, \quad (18)$$

где $M_m = 1 + \frac{\omega_m}{\omega_T - \omega_m}$ – коэффициент, учитывающий понижение уровня

сплава в тигле в процессе заполнения металлопровода;

ω_T, ω_m – площади поперечных сечений тигля и металлопровода, м^2 ;

Z_m – длина металлопровода, м;

l_0 – глубина погружения металлопровода в расплав в тигле в начале заливки формы, м;

m_m – значение газодинамического коэффициента m при заполнении металлопровода, Па/с;

ρ – плотность сплава, кг/м^3 ;

$g = 9,8 \text{ м/с}^2$.

Продолжительность заливки i -го участка полости формы определяется по формуле

$$t_i = M_i \cdot H_i \frac{\rho g}{m_i}, \quad (19)$$

где $M_i = 1 + \frac{\omega_i}{\omega_T - \omega_m}$ – коэффициент, учитывающий понижение уровня

сплава в тигле при заполнении i -го участка полости формы;

ω_i – площадь поперечного сечения i -го участка полости формы, м^2 ;

H_i – высота i -го участка полости формы, м;

m_i – значение газодинамического коэффициента m при заполнении i -го участка полости формы, Па/с.

При *литье вакуумным всасыванием и с противодавлением* продолжительность заполнения металлопровода равна

$$t_m = -\ln \left(1 - M_m (Z_m - l_0) \frac{\rho g}{DPK} \right) \cdot \frac{1}{\beta_m}, \quad (20)$$

где $DPK = P_a - P_p$ при ЛВВ и $DPK = P_n - P_a$ при ЛПрД;

β_m – значение газодинамического коэффициента при заполнении металлопровода.

Продолжительность заполнения нижнего (первого) участка полости формы вычисляется следующим образом:

$$t_1 = -\ln\left(\frac{DPK - M_m(Z_m - l_0) \cdot \rho g - M_1 H_1 \cdot \rho g}{DPK - M_m(Z_m - l_0) \rho g}\right) \cdot \frac{1}{\beta_1}. \quad (21)$$

Продолжительность заполнения i -го ($i > 1$) участка полости формы составляет

$$t_i = -\ln\left(\frac{DPK - M_m(Z_m - l_0) \cdot \rho g - \rho g \sum_{n=1}^i (M_n H_n)}{DPK - M_m(Z_m - l_0) \cdot \rho g - \rho g \sum_{n=1}^{i-1} (M_n H_n)}\right) \cdot \frac{1}{\beta_i}, \quad (22)$$

где β_i – значение коэффициента β при заполнении i -го участка полости формы.

С учетом формул (18) – (22) можно легко определить время включения той или иной диафрагмы или настройки автомата при ЛНД на тот или иной темп m . Например, пусть в отливке можно выделить три участка, отличающихся площадями поперечных сечений. При переходе из металлопровода в нижний участок ($I = 1$) имеет место расширение потока, поэтому $v > (v_p)_{кр}$. При переходе из нижнего участка во второй происходит сужение потока при $\omega_2/\omega_1 = 0,3 < 0,6$. Отношение площадей $\omega_3/\omega_2 = 0,8 > 0,6$. Значит, смену темпа изменения перепада давлений следует проводить в конце заполнения металлопровода и нижнего участка полости формы. Первый темп изменения перепада давлений включается в начальный момент времени, т. е. $t_{в1} = 0$. Первое изменение темпа проводится при $t_{в2} = t_m$, а второе – при $t_{в3} = t_m + t_1$. Величины t_m и t_1 рассчитываются по приведенным выше формулам.

В случае, если полость формы заполняется сплавом при одном темпе изменения перепада давлений ($\beta = \text{const}$ и $m = \text{const}$), расчет продолжительности заливки следует выполнять по приведенным ниже формулам.

При *литье вакуумным всасыванием или с противодавлением* используются формулы

$$t_m = -\ln\left(1 - \frac{M_m(Z_m - l_0) \cdot \rho g}{DPK}\right) \cdot \frac{1}{\beta}, \quad (23)$$

$$t_{\phi} = -\ln \left(\frac{DPK - M_m(Z_m - l_0) \cdot \rho g - M_{\phi} H_{\phi} \cdot \rho g}{DPK - M_m(Z_m - l_0) \cdot \rho g} \right) \cdot \frac{1}{\beta}, \quad (24)$$

где t_{ϕ} – продолжительность заполнения полости формы, с;

H_{ϕ} – высота полости формы, м;

$$M_{\phi} = 1 + \frac{\omega_{\phi}}{\omega_T - \omega_m};$$

ω_{ϕ} – преобладающая площадь поперечного сечения полости формы.

При *литье под низким давлением* применяются формулы

$$t_m = \frac{M}{m} (Z_m - l_0) \cdot \rho g; \quad (25)$$

$$t_{\phi} = \frac{M_{\phi}}{m} H_{\phi} \cdot \rho g. \quad (26)$$

Расчет газодинамических параметров β и m следует выполнять в указанной ниже последовательности.

1. *Анализ конфигурации отливки и выбор способа управления заливкой формы сплавом.* Необходимо выделить по высоте отливки участки полости формы, отличающиеся площадями поперечных сечений, рассчитать площади поперечных сечений ω_i и определить высоты участков H_i . Если в конструкции отливки есть участки с отношением площадей $\omega_{i+1} / \omega_i < 0,6$, то следует применять описанное выше оптимальное управление с дискретным изменением газодинамических коэффициентов в моменты перехода расплава через сужения потока с указанным отношением площадей. При переходе расплава из металлопровода или литников в нижний участок полости формы, как правило, имеет место расширение потока. Если при этом скорость заполнения нижнего участка полости формы превышает критическое значение $(v_p)_{кр}$, то металлопровод и полость формы следует заполнять при разных значениях газодинамических коэффициентов. Если для всех участков отливки отношения площадей не менее 0,6 и для нижнего участка $v_p < (v_p)_{кр}$, то заполнение металлопровода и полости формы можно проводить при постоянных значениях газодинамических коэффициентов.

При последовательном изготовлении отливок уровень сплава в тигле опускается и величина l_0 уменьшается. Поэтому необходимо выполнять перерасчет величины l_0 по формуле

$$l_0 = (l_0)_0 - (n-1) \frac{G}{\rho \omega_r},$$

где $(l_0)_0$ – величина погружения металлопровода в расплав в тигле в начале процесса заливки форм, м.

2. *Расчет значений газодинамических коэффициентов.* При заполнении формы при постоянном темпе изменения перепада газового давления на расплав необходимые значения газодинамических коэффициентов β и m можно определить по следующим формулам, полученным при преобразовании формул (24) и (26):

- для ЛВВ и ЛПрД:

$$\beta = -\ln \left(\frac{DPK - M_m(Z_m - l_0) \cdot \rho g - M_\phi H_\phi \cdot \rho g}{DPK - M_m \cdot \rho g} \right) \cdot \frac{1}{t_{\text{опт}}}; \quad (27)$$

- для ЛНД:

$$m = M_\phi \cdot H_\phi \cdot \rho g \cdot \frac{1}{t_{\text{опт}}}, \quad (28)$$

где $t_{\text{опт}}$ – оптимальная продолжительность заливки формы, с.

В случае применения оптимального управления заливкой форм необходимо определить значения газодинамических коэффициентов для всех участков по высоте полости формы, разделенных местами сужения потока сплава при $\omega_{i+1}/\omega_i < 0,6$.

При ЛРД питание отливки осуществляется снизу из металлопровода. Поэтому в технологичных отливках наиболее тонкостенные элементы должны располагаться в верхней части. Прежде всего рассчитывают газодинамические коэффициенты при заполнении этих элементов по формулам

$$\beta_N = -\ln \left(\frac{DPK - M_m(Z_m - l_0) \cdot \rho g - \rho g \sum_{i=1}^N (M_i H_i)}{DPK - M_m(Z_m - l_0) \cdot \rho g - \rho g \sum_{i=1}^{N-1} (M_i H_i)} \right) \cdot \frac{1}{t_{N\text{опт}}}, \quad (29)$$

$$m_N = M_N \cdot H_N \cdot \rho g \cdot \frac{1}{t_{N\text{опт}}}, \quad (30)$$

где N – число выделенных участков отливки;

$t_{N\text{опт}}$ – оптимальная продолжительность заливки тонкостенного N -го элемента отливки, с.

Значения газодинамических коэффициентов для остальных элементов отливки ($1 \leq I \leq N$) рассчитываются по формулам (13) и (14).

Если для нижнего участка ($I = 1$)

$$v_p = \frac{DPK \cdot \beta_1}{M_1 \cdot \rho g} > (v_p)_{\text{кр}} \text{ (ЛВВ и ЛПрД)}$$

или

$$v_p = \frac{m}{\rho g} \text{ (ЛНД)},$$

то газодинамические коэффициенты для заполнения металлопровода следует рассчитывать по формулам, полученным при преобразовании формул (11) и (12):

$$\beta_m = \beta_1 \frac{\omega_1}{K \cdot \omega_m}; \quad (31)$$

$$m_m = m_1 \frac{\omega_1}{K \cdot \omega_m}. \quad (32)$$

Если эти условия не выполняются, то металлопровод заполняется при тех же значениях газодинамических коэффициентов, что и нижний участок полости формы, т. е. $\beta_m = \beta_1$ и $m_m = m_1$.

3. *Расчет площадей дросселирующих устройств (при ЛВВ и ЛПрД).*
Расчет площадей дросселирующих устройств, обеспечивающих заполнение формы при вычисленных значениях коэффициента β , выполняется по формулам (15) и (16). При ЛВВ принимается $P_a - P_p = 66500$ Па, а при ЛПрД чаще всего $P_n - P_a = 500000$ Па.

4. Расчет моментов времени изменения темпа нарастания перепада давлений на расплав в процессе заливки формы сплавом. Расчет выполняется с использованием формул (18) – (22).

Методика определения оптимальной продолжительности заливки представлена ниже. Для иллюстрации рассмотрим примеры расчета газодинамических параметров при заливке форм сплавом.

Пример 1

На рис. 11 приведен чертеж отливки «Рабочее колесо гидромолоты». Отливка из алюминиевого сплава АК7ч изготавливается литьем вакуумным всасыванием.

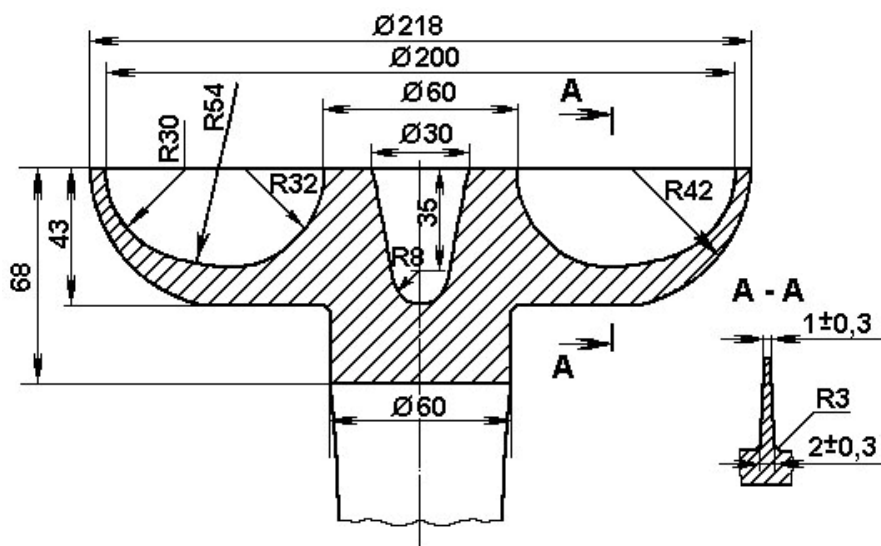


Рис. 11. Чертеж отливки «Рабочее колесо гидромолоты»

Исходные данные: объем вакуумной камеры $V_k = 0,1 \text{ м}^3$; длина металлопровода $Z_m = 0,8 \text{ м}$; начальное заглубление металлопровода в расплав в тигле $l_0 = 0,4 \text{ м}$; диаметр металлопровода – 80 мм; площадь сечения металлопровода $\omega_m = 50 \text{ см}^2$; площадь зеркала расплава в тигле $\omega_T = 1256 \text{ см}^2$; плотность сплава $\rho = 2350 \text{ кг/м}^3$; оптимальная продолжительность заливки полостей лопаток $t_b = 0,45 \text{ с}$; температура воздуха в камере $T_k = 473 \text{ К}$.

Отливку можно представить как комбинацию нижней, горизонтально протяженной части (тарелки) с площадью сечения $\omega_n = 154 \text{ см}^2$ и высотой $H_n = 13 \text{ мм}$ и вертикально отходящих от нее тонкостенных лопаток с суммарной площадью сечения $\omega_b = 30 \text{ см}^2$, высотой $H_b = 32 \text{ мм}$ и толщиной стенки 0,18 см. Отношение площадей $\omega_b/\omega_n = 30/154 = 0,195 < 0,6$. Поэтому

применяем оптимальное управление заливкой формы, т. е. нижнюю и верхнюю части полости формы заполняем при разных значениях газодинамического коэффициента β .

Рассчитаем коэффициенты, учитывающие понижение уровня сплава в тигле в процессе заполнения металлопровода и участков полости формы:

$$M_M = 1 + 50/(1256 - 50) = 1,041;$$

$$M_H = 1 + 154/(1256 - 50) = 1,128;$$

$$M_B = 1 + 30/(1256 - 50) = 1,025.$$

По формуле (29) вычислим значение коэффициента β для верхнего тонкостенного участка отливки:

$$\beta_B = -\frac{1}{0,45} \cdot \ln \left(\frac{66500 - 2350 \cdot 9,8 \cdot (0,4 \cdot 1,04 + 1,18 \cdot 0,013 - 1,025 \cdot 0,032)}{66500 - 2350 \cdot 9,8 \cdot (1,04 \cdot 0,4 + 1,18 \cdot 0,013)} \right) = 0,03.$$

По формуле (13) рассчитаем значение газодинамического коэффициента β для заполнения нижнего участка полости формы:

$$\beta_H = 0,03 \cdot 30 / 154 = 0,0058 \text{ с}^{-1}.$$

При заполнении нижней части полости формы

$$v_p = 66500 \cdot 0,0058 / 1,128 \cdot 2350 \cdot 9,8 = 0,015 \text{ м/с} = 1,5 \text{ см/с}.$$

По графику, изображенному на рис. 7, при $\omega_H/\omega_M = 154/50 = 3,08$ находим $(v_p)_{кр} = 15,9 \text{ см/с}$. Так как $v_p < (v_p)_{кр}$, металлопровод следует заполнять при том же значении β , что и нижнюю часть полости формы, т. е. $\beta_M = \beta_H = 0,0058 \text{ с}^{-1}$.

Определим площадь проходного сечения диафрагм, устанавливаемых в газовую сеть, для обеспечения рассчитанных значений коэффициентов β . По формуле (15) находим, что на этапе заполнения верхней части полости формы включается диафрагма с площадью сечения $\omega_{д.в} = 0,03 \cdot (66500)^{0,79} \cdot 0,1/1,33 = 14,56 \text{ мм}^2$ (диаметр отверстия в диафрагме $D_{д.в} = 4,3 \text{ мм}$). Площадь проходного сечения диафрагмы, включенной в систему при заполнении металлопровода и нижней части полости формы, равна $\omega_{д.н} = 0,0058 \cdot (66500)^{0,79} \cdot 0,1/1,33 = 2,8 \text{ мм}^2$ (диаметр отверстия в диафрагме $D_{д.н} = 1,9 \text{ мм}$).

Заполнение формы осуществляется при последовательном включении в вакуумную сеть двух диафрагм с разными проходными сечениями. В на-

чале процесса при $t = 0$ включается диафрагма с площадью сечения $2,8 \text{ мм}^2$. После заполнения металлопровода и нижней части полости формы производится переключение диафрагм с подключением диафрагмы с площадью сечения $14,56 \text{ мм}^2$. Время, требуемое для переключения диафрагм, t_{Π} равно сумме времени, необходимого для заполнения металлопровода $t_{\text{м}}$ и нижнего участка полости формы $t_{\text{н}}$. Значения $t_{\text{м}}$ и $t_{\text{н}}$ найдем по формулам (20) и (21):

$$t_{\text{м}} = -\ln(1 - (66500 - 1,041 \cdot 2350 \cdot 9,8 \cdot 0,4)/66500)/0,0058 = 26,8 \text{ с};$$

$$t_{\text{н}} = -\ln((66500 - 1,041 \cdot 2350 \cdot 9,8 \cdot 0,4 - 1,128 \cdot 2350 \cdot 9,8 \cdot 0,013)/(66500 - 1,041 \cdot 2350 \cdot 9,8 \cdot 0,4))/0,03 = 1 \text{ с}.$$

Время переключения диафрагм составляет $t_{\Pi} = 26,8 + 1 = 27,8 \text{ с}$.

Пример 2

На рис. 12 приведен чертеж отливки «Втулка». Отливка изготавливается из сплава АК7ч литьем под низким давлением. Требуется определить газодинамические параметры при заливке формы для этой отливки.

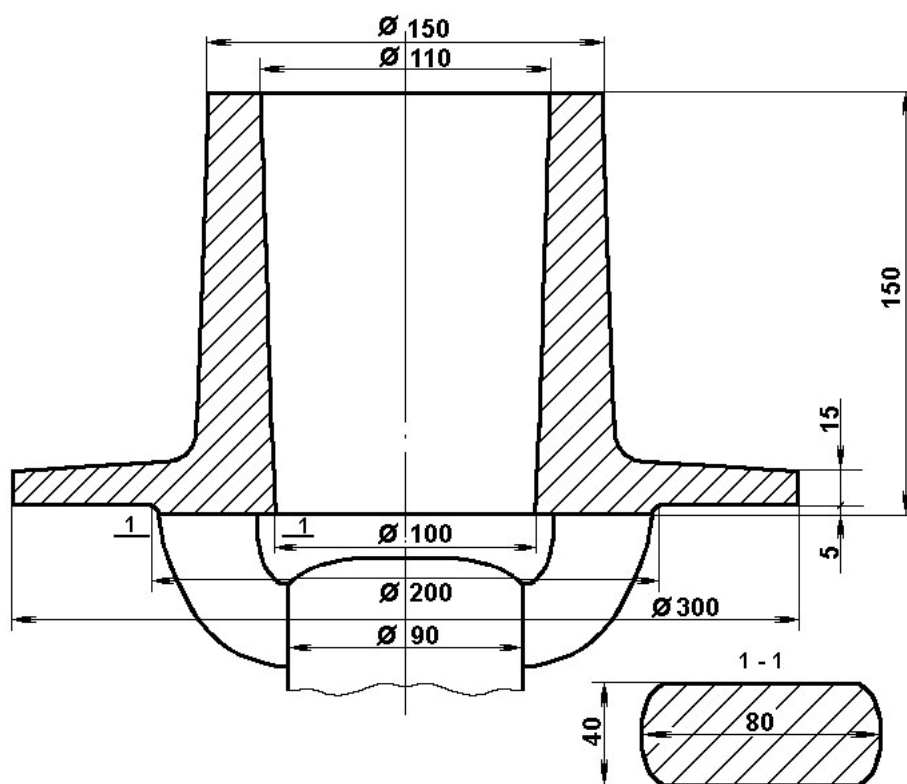


Рис. 12. Чертеж отливки «Втулка»

Исходные данные: диаметр металлопровода – 90 мм; площадь поперечного сечения металлопровода $\omega_m = 63,6 \text{ см}^2$; площадь зеркала сплава в тигле $\omega_t = 1256 \text{ см}^2$; длина металлопровода $Z_m = 0,8 \text{ м}$; начальное заглубление металлопровода в расплав в тигле $l_0 = 0,4 \text{ м}$; оптимальная продолжительность заливки верхней цилиндрической части отливки $t_b = 2,5 \text{ с}$.

Отливка представляет собой комбинацию нижней фланцевой части, имеющей площадь сечения $\omega_n = 628 \text{ см}^2$ и высоту $H_n = 0,02 \text{ м}$, с верхней цилиндрической частью площадью $\omega_b = 90 \text{ см}^2$ и высотой $H_b = 0,13 \text{ м}$.

$$M_m = 1 + 63,6 / (1256 - 63,6) = 1,053;$$

$$M_n = 1 + 628 / (1256 - 63,6) = 1,526;$$

$$M_b = 1 + 90 / (1256 - 63,6) = 1,076.$$

Отношение площадей $\omega_b / \omega_n = 90 / 628 = 0,14 < 0,6$. Поэтому нижнюю и верхнюю части полости формы заполняем при различных темпах изменения перепада давлений на расплав. Газодинамический коэффициент при заполнении верхней части полости формы в соответствии с формулой (30) равен $m_b = 1,076 \cdot 2350 \cdot 9,8 \cdot 0,13 / 2,5 = 1280 \text{ Па/с}$.

По формуле (14) рассчитываем значение газодинамического коэффициента для заполнения нижней части полости формы:

$$m_n = 1280 \cdot 90 / 628 = 183 \text{ Па/с}.$$

При заполнении нижней части полости формы

$$v_p = 183 / 1,526 \cdot 2350 \cdot 9,8 = 0,005 \text{ м/с} = 0,5 \text{ см/с}.$$

По графику, изображенному на рис. 7, при $\omega_n / \omega_m = 628 / 63,6 = 10$ находим $(v_p)_{кр} = 1,4 \text{ см/с}$. Так как $v_p < (v_p)_{кр}$, заполнение металлопровода и нижней части полости формы проводим при одинаковых темпах изменения перепада давлений, т. е. $m_m = m_n = 183 \text{ Па/с}$.

Продолжительность заполнения металлопровода и нижнего участка полости формы в соответствии с формулами (18) и (19) равна

$$t_m = 1,053 \cdot 0,4 \cdot 2350 \cdot 9,8 / 183 = 53 \text{ с};$$

$$t_n = 526 \cdot 0,02 \cdot 2350 \cdot 9,8 / 183 = 3,8 \text{ с}.$$

Время переключения темпов составляет $t_{\Pi} = 53 + 3,8 = 56,8 \text{ с}$.

Глава 3. ОПТИМАЛЬНАЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ЗАЛИВКИ ФОРМЫ СПЛАВОМ

Оптимальная продолжительность заливки определяется теплофизическими свойствами сплава и материала формы, толщиной и видом кокильного покрытия, условиями заливки, а также размерами и конфигурацией отливки. Можно выделить пять типов конфигураций отливок:

1. *Отливки вертикальной протяженности* (рис. 13, г). При заполнении форм для отливок данного типа основная часть потока сплава направлена вертикально вверх. Геометрически отливка может не являться плитой, она может иметь усложнения конфигурации в виде бобышек, фланцев и других элементов. Перепад толщин стенок по высоте отливки не должен превышать 30 %.

2. *Отливки горизонтальной протяженности* (рис. 13, в, е). Характерным для отливок данного типа является значительное (более чем в 5–10 раз) превышение длины над высотой (толщиной стенки). Перепады толщин стенок в горизонтальном направлении не должны превышать 30–50 %. Отливка может содержать различные усложнения конфигурации.

3. *Отливки корпусного типа или типа полого цилиндра* (рис. 13, ж, з, и). К данному типу относятся отливки, имеющие протяженное по высоте замкнутое поперечное сечение, ограниченное снаружи и изнутри металлической формой или стержнями.

4. *Отливки, представляющие собой комбинацию типовых элементов*, рассмотренных выше (рис. 13, б).

5. *Отливки сложной конфигурации*, которые трудно отнести к рассмотренным выше типам (рис. 13, а).

При расчете оптимальной продолжительности заливки $t_{\text{опт}}$ для отливок из алюминиевых сплавов можно применять следующие формулы:

1. Для *отливок вертикальной протяженности* при толщине стенки более 10 мм используется формула

$$t_{\text{опт}} = 7,75 + 3X_1 + 0,38X_2 + 0,88X_3 + 0,13X_1X_2 + 0,38X_1X_3, \quad (33)$$

где $t_{\text{опт}}$ – оптимальная продолжительность заливки, с;

$$X_1 = (\delta_{\text{отл}} - 35)/15;$$

$$X_2 = (H_{\text{отл}} - 175)/75;$$

$$X_3 = (T_0 - 725)/25;$$

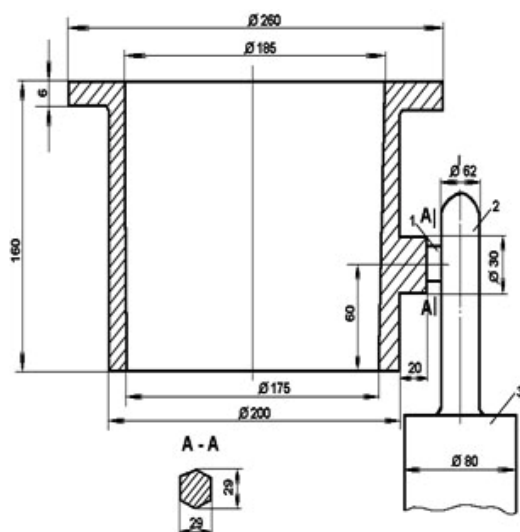
$\delta_{\text{отл}}$ и $H_{\text{отл}}$ – толщина стенки и высота отливки, мм;

T_0 – температура сплава в тигле, °С.

a 

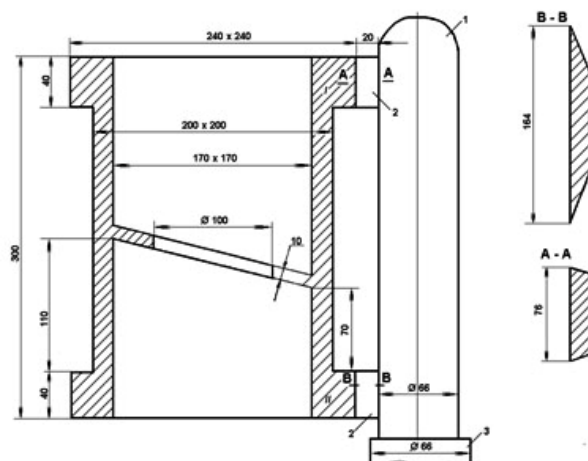
Подвод сплава сбоку

Ж



Боковой подвод на нескольких уровнях

З



Вертикально-щелевая литниково-питающая система

и

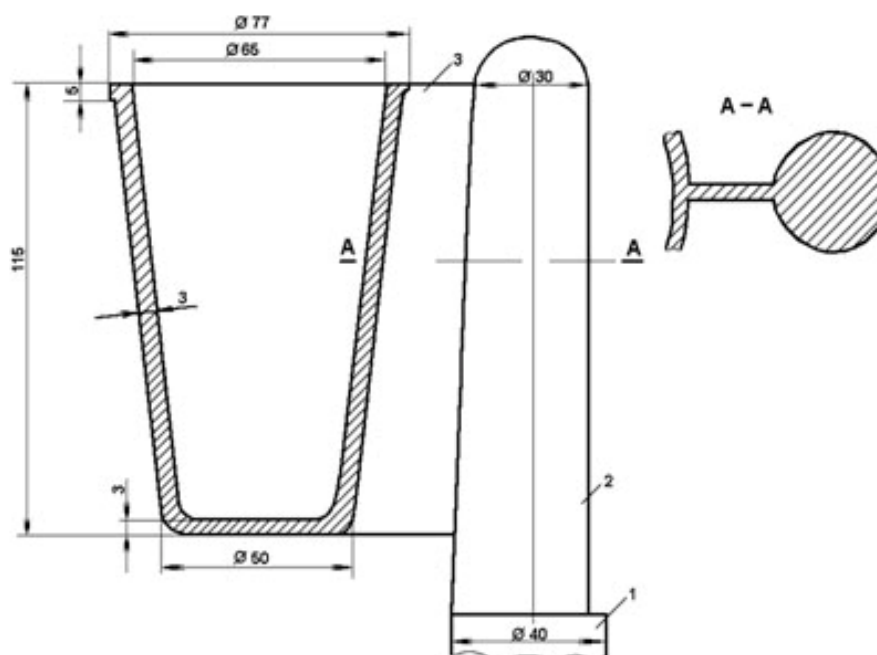


Рис. 13. Окончание

2. Для отливок горизонтальной протяженности справедлива формула

$$t_{\text{опт}} = \frac{H_{\text{отл}}}{v_{\text{опт}}}.$$

$$v_{\text{опт}} = 23,9 - 6,1X_1 + 1,9X_2 - 5,1X_3 - 1,5X_1X_2 + 2,4X_1X_3, \quad (34)$$

где $v_{\text{опт}}$ – оптимальная скорость заливки, мм/с;

$$X_1 = (\delta_{\text{отл}} - 15)/10;$$

$$X_2 = (L - 200)/50;$$

$$X_3 = (T_0 - 750)/50;$$

L – длина отливки в горизонтальном направлении, мм.

3. Для отливок корпусного типа или типа полого цилиндра при толщине стенки $\delta_{\text{отл}} \leq 10$ мм расчет производится по формуле

$$t_{\text{опт}} = 3,74 + 1,4X_1 + 0,2X_2 + 0,5X_3 + 0,1X_1 \cdot X_3, \quad (35)$$

где $X_1 = (\delta_{\text{отл}} - 15) / 5;$

$$X_2 = (D - 200) / 100;$$

$$X_3 = (T_0 - 725) / 25;$$

D – диаметр или максимальная длина внутреннего контура корпусной отливки, мм.

4. В случае комбинированной конфигурации отливки (тип 4) необходимо выполнить расчет времени и скорости заливки для всех элементов отливки. Если перепад площадей сечений по высоте отливки не превышает 40 %, то заливка формы осуществляется при постоянном темпе изменения перепада давлений, обеспечивающем наибольшее из рассчитанных значение скорости заливки. Если это условие не выполняется, то заполнение соседних элементов при $\omega_{i+1}/\omega_i < 0,6$ осуществляется при разных темпах изменения перепада давлений. Расчет газодинамических параметров выполняется по методике, рассмотренной в гл. 2.

Качественное заполнение тонкостенных элементов определяется заполняемостью формы сплавом, которая характеризуется максимальной продолжительностью течения сплава до остановки потока $t_{\text{теч}}$. Для отливок из

алюминиевого сплава АК7ч с толщиной стенки меньше 10 мм величину $t_{\text{теч}}$ можно определить по формуле

$$t_{\text{теч}} = 3,3 + 1,9X_1 + 0,8X_2 + 0,3X_3 + 0,4X_4 + 0,3X_1X_2 + 0,2X_1X_3 + 0,2X_1X_4 + 0,1X_2X_3 + 0,1X_2X_4, \quad (36)$$

где $X_1 = (\delta_{\text{отл}} - 7) / 3$;

$X_2 = (\delta_{\text{кр}} / \lambda_{\text{кр}} - 4,5) / 1,5$;

$X_3 = (T_{20} - 200) / 50$;

$X_4 = (T_{10} - 725) / 25$;

$\delta_{\text{кр}}$ – толщина слоя кокильного покрытия, см;

$\lambda_{\text{кр}}$ – теплопроводность кокильной краски, Вт/(см·К);

T_{10} – температура сплава в тигле, °С;

T_{20} – начальная температура формы, °С.

Вследствие действия нарастающего во времени перепада давлений скорость сплава в процессе заливки тонкостенных отливок остается практически постоянной вплоть до момента остановки потока. Это обуславливает высокую заполняемость форм при ЛРД, особенно при литье вакуумным всасыванием.

5. Для *отливок сложной конфигурации* (тип 5) оптимальную продолжительность заливки можно определить по формуле

$$t_{\text{опт}} = S \cdot \sqrt[3]{\delta \cdot G}, \quad (37)$$

где S – коэффициент продолжительности заливки, $S = 2,4-3,2$;

δ – преобладающая толщина стенки отливки, мм;

G – масса отливки, кг.

Оптимальную скорость заливки можно также определить по разработанной в Уральском научно-исследовательском технологическом институте (УралНИТИ) номограмме, приведенной на рис. 14. Номограмма приемлема для отливок из алюминиевых сплавов при отношениях наибольшей толщины стенки к наименьшей, не превышающих 1,5. На рис. 14 показан пример определения скорости заливки для отливки массой 13 кг с толщиной стенки 35 мм и высотой 40 см.

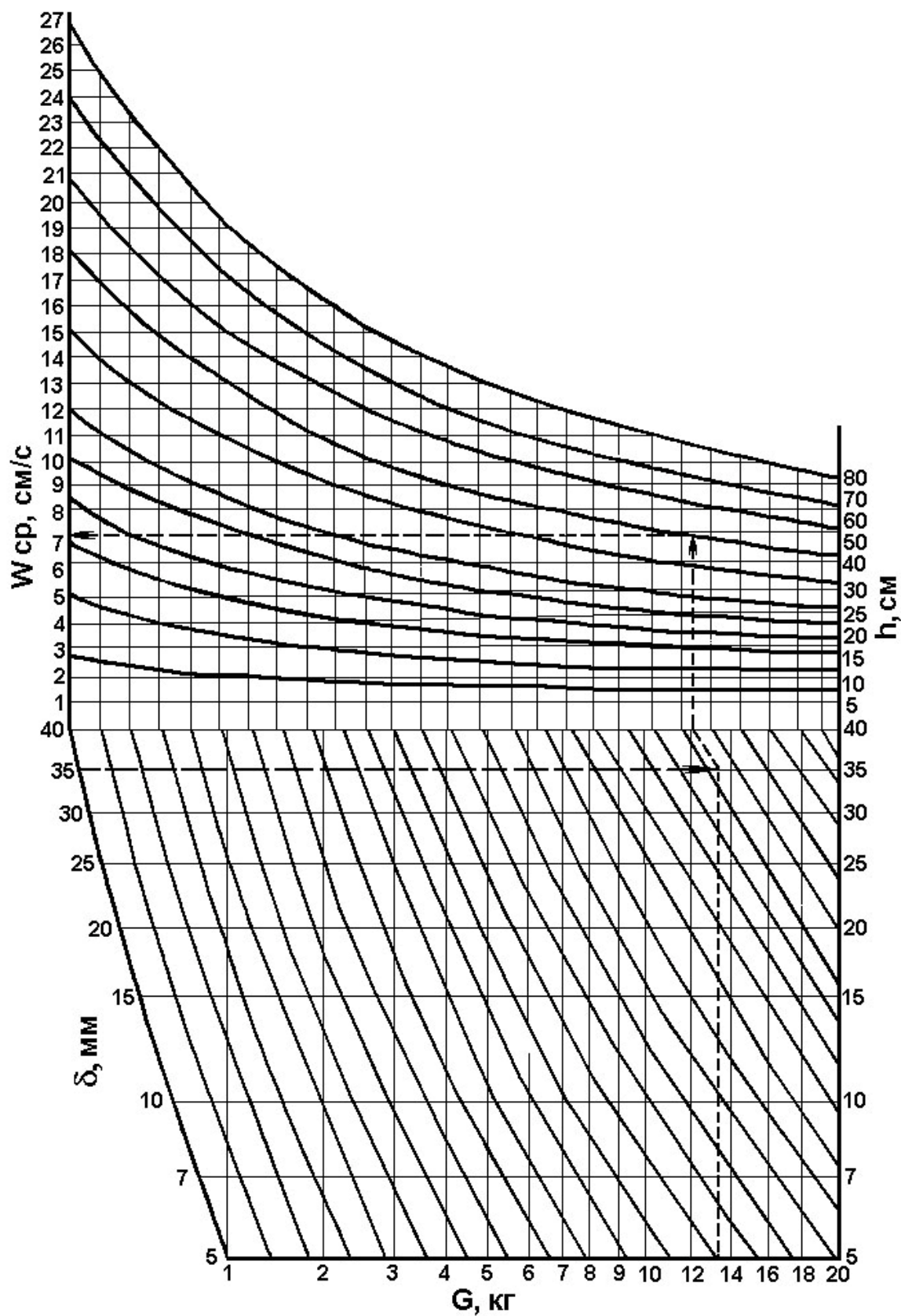


Рис. 14. Номограмма для определения оптимальной скорости заливки форм алюминиевыми сплавами

Глава 4. ЛИТНИКОВО-ПИТАЮЩИЕ СИСТЕМЫ. ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

Литниково-питающие системы (ЛПС) при ЛРД, как правило, не являются регуляторами продолжительности заливки форм, которая обеспечивается принятым темпом нарастания перепада газового давления на расплав. Гидравлический расчет ЛПС сводится к определению их оптимальных размеров, при которых выполняются сформулированные выше условия плавного, качественного заполнения форм сплавом.

Важнейшим требованием к ЛПС выступает обеспечение питания затвердевающей отливки расплавом из металлопровода без применения прибылей. Основные типы литниково-питающих систем, используемых при ЛРД:

- ЛПС при нижнем центральном подводе сплава непосредственно через металлопровод или установленную в нем втулку (см. рис. 13, а, б, в, г);
- нижняя рассредоточенная ЛПС (см. рис. 13, д, е);
- боковая рассредоточенная ЛПС (см. рис. 13, з);
- ЛПС при нижнем боковом подводе сплава;
- ЛПС при боковом подводе сплава на некотором уровне (см. рис. 13, ж);
- ЛПС при подводе сплава на двух или нескольких уровнях (см. рис. 13, з);
- вертикально-щелевая ЛПС (см. рис. 13, и).

В случае *подвода сплава через втулку, установленную в металлопровод*, при переходе сплава во втулку происходит его дросселирование, что может привести к колебаниям уровня сплава как во втулке, так и в полости формы. Для исключения этих нежелательных явлений необходимо диаметр втулки выбирать таким образом, чтобы отношение площади проходного сечения втулки к площади металлопровода удовлетворяло условию $\omega_v/\omega_m \geq 0,6$. Для сглаживания колебаний скорости сплава при заполнении втулки ее высота должна быть больше некоторых минимальных значений, зависящих от принятого темпа изменения перепада давлений при заливке формы.

Рассредоточенный нижний или боковой подвод сплава осуществляется при изготовлении корпусных отливок через ряд распределенных по периметру отливки питателей. Питатели расположены или горизонтально,

или с небольшим повышением их уровня. Так как геометрический напор в процессе заполнения питателей при таком их расположении практически не изменяется, происходит монотонное возрастание скорости под действием нарастающего перепада давлений. В результате скорость сплава на выходе из питателей v может значительно превышать v_p , а значение критерия ϵ_v может достигать 40 % и более. Поэтому для обеспечения качественного заполнения форм через данные ЛПС необходимо применять оптимальное управление заливкой форм, при котором металлопровод с питателями и полость формы заполняются с разными значениями коэффициента β или m . Отношение суммарной площади сечения питателей ω_p к площади металлопровода должно быть не менее 0,6.

Если термический центр отливки расположен сбоку внизу или на некоторой высоте, то целесообразно применение *боковой ЛПС*. В данном случае длина питателей невелика (не более 30–50 мм) и можно принять, что питатель заполняется мгновенно и скорость сплава на выходе из него практически равна v_p . При выполнении условия $\omega_p/\omega_m \geq 0,6$ качественное заполнение формы обеспечивается в широком интервале значений $\omega_f/\omega_p \geq 1$ и β или m .

Боковой подвод на некотором уровне применим, если уровень питателя над низом формы при литье алюминиевых сплавов не превышает 50 мм. Как показала практика применения этих систем, при большей высоте падения алюминиевого сплава в полость формы из питателя в отливках возникают дефекты, связанные с окислением сплава и разрывом окисной пленки. Поэтому при более высоком положении термического центра или наличии нескольких термических узлов по высоте отливки следует осуществлять *подвод сплава на двух или нескольких уровнях*. Влияние площадей питателей на продолжительность заливки не значимо при диапазоне варьирования отношения площадей питателя и стояка в пределах $0,2 \leq \omega_p / \omega_c \leq 2$.

Гидравлический расчет данных систем сводится к определению значений газодинамических коэффициентов и минимальных значений отношения площади нижнего питателя к площади стояка, при которых максимальный перепад уровней сплава в стояке и полости формы в процессе заполнения стояка не превышает допустимых с точки зрения образования окисных плен в отливках значений (не более 30–50 мм). Для исключения колебаний уровня сплава в стояке его площадь должна удовлетворять условию $\omega_c / \omega_m \geq 0,6$.

Вертикально-щелевые системы применяются при заполнении форм для отливок с протяженными тонкими стенками и при наличии нескольких термических узлов по высоте отливки. При заполнении формы через вертикально-щелевую систему в месте перехода сплава из щели в полость формы происходит гидравлический прыжок. При перепаде уровней сплава на щелевом питателе, превышающем 40 мм (при литье алюминиевых сплавов), гидравлический прыжок сопровождается образованием обширной поперечной вихревой зоны на свободной поверхности сплава в полости формы. В отливках при этом обнаруживаются окисные пленки. Поэтому вертикально-щелевая система должна быть сконструирована таким образом, чтобы перепад уровней сплава в стояке и полости формы не превышал 40 мм. Это можно обеспечить, если ширина щели будет не меньше некоторого минимального значения. Гидравлический расчет вертикально-щелевых систем сводится к определению диаметра стояка и значений газодинамических коэффициентов β и m , а также минимальной ширины щели, при которой обеспечивается качественное заполнение полости формы. Диаметр стояка выбирается исходя из выполнения условия $\omega_c \geq 0,6\omega_m$.

Важнейшим требованием к литниковым системам при ЛРД является обеспечение непрерывного питания затвердевающей отливки через литниковые каналы из металлопровода. Для этого подвод сплава должен быть осуществлен ко всем изолированным друг от друга термическим узлам. Размеры литниковых каналов и условия теплоизоляции их поверхностей следует выбирать таким образом, чтобы обеспечивалось направленное к металлопроводу затвердевание отливки и литников. При этом продолжительность снижения температуры в центре сечения питателя до температуры нулевой жидкотекучести должна быть не меньше времени полного затвердевания питаемого узла отливки.

Решение этой задачи выполнено при анализе комплексной краевой задачи тепломассопереноса при затвердевании сплава в системе «отливка – литники и форма». В результате обобщения численного решения указанной задачи получены формулы для расчета параметров литниковых систем рассмотренных выше типов, включенные в программу системы автоматического расчета технологических параметров (см. гл. 8).

Характерной особенностью рассматриваемых способов литья является формирование отливок под действием повышенных избыточных перепа-

дов давлений. При литье с противодавлением, кроме того, действует повышенное всестороннее газовое давление. Данные факторы оказывают существенное влияние на затвердевание, кристаллизацию и питание отливок.

При всех разновидностях ЛРД наблюдается увеличение скорости затвердевания отливок по сравнению с обычными способами литья. При этом интенсифицируется дендритная кристаллизация, измельчается размер равноосных кристаллов и сокращается протяженность столбчатой зоны. Важнейшими параметрами, отличающими способы ЛРД, являются величина, скорость и время приложения избыточного перепада давлений. Прежде всего, повышенное давление на расплав интенсифицирует теплообмен на границе между отливкой и формой. Рассмотрим закономерности влияния давления на процессы теплообмена в системе «отливка – форма – окружающая среда» при литье в металлические формы.

Коэффициент теплоотдачи на границе отливки и формы α_1 определяется параметрами кокильного покрытия и развитием газового зазора между поверхностями отливки и формы:

$$\alpha_1 = \frac{1}{\frac{\delta_{кр}}{\lambda_{кр}} + \frac{1}{\alpha_{изл} + \frac{\lambda_{газ}}{\delta_{газ}}}},$$

где $\delta_{кр}$ и $\lambda_{кр}$ – толщина и теплопроводность кокильного покрытия;
 $\delta_{газ}$ и $\lambda_{газ}$ – толщина газового зазора и теплопроводность газа в зазоре;
 $\alpha_{изл}$ – коэффициент теплопередачи излучением в зазоре.

Образование газового зазора обусловлено упругими деформациями стенок металлической формы при их неравномерном нагреве в начальные моменты после заливки. Интенсивность охлаждения отливки, определяемая величиной α_1 , тем больше, чем меньше конечная толщина газового зазора и больше относительная длительность плотного контакта отливки и формы $t_{к.о} = t_{нач}/t_{затв}$, где $t_{нач}$ – время начала образования зазора; $t_{затв}$ – продолжительность затвердевания отливки.

Повышенный перепад давлений, действующий со стороны жидкого расплава на твердую корку, прижимает ее к поверхности стенки формы в течение времени, приближающегося к продолжительности затвердевания.

Увеличение интенсивности теплопередачи через границу между отливкой и формой путем замедления развития газового зазора является главной причиной ускорения затвердевания отливок при увеличении перепада давлений в условиях литья под низким давлением и вакуумным всасыванием. Согласно экспериментальным данным при литье под низким давлением при увеличении перепада давлений от 0 до 0,15 МПа значение $t_{к.о}$ возрастает с 0,3 до 0,8 с. При этом продолжительность затвердевания сокращается, по данным Г. П. Борисова, в 1,6 раза [1]. В принципе, для каждой отливки в конкретных условиях ее изготовления существует предельное значение давления, при превышении которого оно перестает сказываться на продолжительности затвердевания, так как коэффициент теплопередачи α_1 становится практически равным значению $\lambda_{кр}/\delta_{кр}$, соответствующему отсутствию газового зазора. Как показали исследования, при ЛВВ и ЛНД увеличение перепада давлений выше 30 кПа практически не влияет на скорость охлаждения затвердевающей отливки, т. е. развитием газового зазора при расчете кинетики затвердевания можно пренебречь.

Степень влияния повышения перепада газового давления на продолжительность затвердевания отливок возрастает с увеличением интервала кристаллизации сплава и толщины стенки отливки. Например, продолжительность затвердевания отливок с толщиной стенки 40 мм из сплава АЛ7-3Л (интервал кристаллизации 170 °С) при увеличении перепада давлений до 77 кПа снизилась в 2,5 раза, а для отливок из сплава АК7ч (интервал кристаллизации 33 °С) при тех же условиях – в 1,4 раза.

Рассмотрим влияние повышения всестороннего газового давления, которое имеет место при литье с противодавлением. В случае литья в металлические формы влияние внешнего давления на скорость охлаждения отливки проявляется через влияние на коэффициент теплопередачи с наружной поверхности формы во внешнюю среду α_2 . Теплопередача осуществляется свободной конвекцией и тепловым излучением. С повышением давления увеличивается плотность окружающего форму воздуха, что приводит к росту критерия Грасгофа и конвективного коэффициента теплоотдачи. При повышении противодавления до 0,6 и 2 МПа конвективный коэффициент теплоотдачи увеличивается соответственно в 3,3 и 7,4 раза по сравнению с условиями при литье под низким давлением. По данным Г. П. Борисова, при давлении 0,4 МПа продолжительность затвердевания отливок из алюминиевых сплавов сокращается в 1,4 раза [1]. Характер затвердевания сплава ста-

новится преимущественно последовательным с формированием усадочной раковины и уменьшением усадочной пористости.

Для управления кинетикой затвердевания расплава в полости формы и литниковых каналах применяют те же составы кокильных красок, что и при кокильном литье. Чаще всего при литье алюминиевых сплавов используют краску на основе окиси цинка и жидкого стекла. Толщина покрытия – 0,1 мм, а для отливок с толщиной стенки менее 5 мм – 0,2 мм. Для теплоизоляции поверхности литников можно применять асбестовые краски с низким коэффициентом теплопроводности.

Воздействие на расплав повышенного давления приводит к усилению как суспензионного, так и фильтрационного процесса питания отливки и к снижению пористости в отливках в 2–2,5 раза по сравнению с обычным кокильным литьем. Когда в конструкции отливки имеются узлы, которые трудно или невозможно пропитать через литники, применяют глухие прибыли или прибыли, соединенные через вентиляционные каналы с окружающим форму пространством. Применительно к литью под низким давлением разработан процесс, при котором после заливки формы расплав отсекается от металлопровода и к нему через прибыли подводится поршневое давление. При этом резко снижается пористость отливок и повышаются их механические свойства.

Глава 5. ТРЕБОВАНИЯ К КОНСТРУКЦИИ ОТЛИВОК. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ

При литье под регулируемым давлением в основном изготавливают отливки из различных алюминиевых сплавов. Есть опыт изготовления отливок из магниевых сплавов (с применением при ЛНД и ЛПрД давления инертных газов), из медных сплавов, чугуна и стали. Как правило, отливки получают в металлических формах, хотя возможно применение песчаных и керамических форм. Конструкции отливок, изготавливаемых в металлических формах, должны соответствовать требованиям, сформулированным применительно к литью в кокиль. Однако также необходимо выполнение дополнительных, учитывающих специфику ЛРД, требований. Так как при ЛРД питание отливки осуществляется в направлении снизу вверх, конструкция отливки должна удовлетворять условиям направленного вниз, к металлопроводу, затвердевания. Целесообразно расположение массивных термических узлов внизу от-

ливки. Это позволяет обеспечить питание отливки без применения прибылей и сложных распределенных литниково-питающих систем.

Использование повышенного давления позволяет на 1–2 класса увеличить точность отливок и в 1,5–2 раза снизить припуски на механическую обработку по сравнению с обычным кокильным литьем (ГОСТ 26645–85). Шероховатость поверхности отливок снижается с $Rz = 80–160$ мкм при кокильном литье до $Rz = 20–40$ мкм при ЛРД.

Минимальная толщина стенки отливки при ЛРД в 1,5–2,5 раза меньше, чем при кокильном литье. Наиболее технологичные отливки можно получать при одной горизонтальной или вертикальной плоскости разъема. Отработку технологичности конструкции отливок целесообразно осуществлять в соответствии с требованиями ГОСТ 14201–73 – 14204–73.

При ЛВВ и ЛПрД желательно, чтобы отливка имела одну горизонтальную плоскость разъема. Это обусловлено наличием камеры, в которую помещена форма и которая не позволяет осуществить раскрытие полуформ в горизонтальном направлении. При ЛНД форма открыта, что дает возможность механизировать ее обслуживание при любой плоскости разъема формы. Этим объясняется преимущественное применение ЛНД среди других способов ЛРД.

Литье под регулируемым давлением занимает промежуточное положение между литьем в кокиль и литьем под давлением. Поэтому для изготовления отливок принципиально возможно применение кокилей и пресс-форм. При использовании пресс-форм обеспечивается более высокая точность отливок и более качественная их поверхность. Однако из-за высокой стоимости пресс-форм в практике ЛРД наибольшее применение нашли металлические формы – кокили. Отметим особенности конструкций металлических форм при ЛРД.

В случае кокильного литья при вертикальной плоскости разъема отливка при раскрытии формы должна оставаться в подвижной полуформе, из которой она удаляется выталкивателями. В условиях ЛРД при раскрытии формы отливка должна оставаться в центре, так как ее положение зафиксировано остатком затвердевшего сплава в металлопроводе. Система выталкивателей должна фиксировать отливку в центральном положении. Целесообразно фиксирование отливки в верхней полуформе или на стержне с последующим выталкиванием ее при полном раскрытии формы. При необходимости для выполнения этого условия предусматривают специ-

альные технологические приливы. На рис. 15 показан пример применения таких приливов. Благодаря приливу при раскрытии формы отливка увлекается вверх, а затем толкателями сбрасывается вниз.

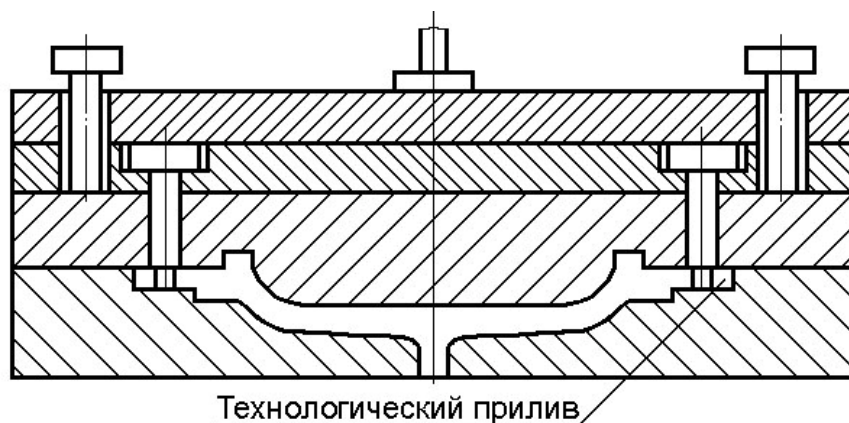


Рис. 15. Схема применения технологических приливов

Система применения выталкивателей и контрвыталкивателей при ЛРД аналогична системе, используемой при кокильном литье и литье под давлением. Контрвыталкиватели применяются для возвращения плиты выталкивателей при сборке формы перед очередной заливкой в исходное положение. При ЛРД в случае совпадения поверхности отливки с плоскостью разъема формы целесообразно совмещать функции контрвыталкивателей и выталкивателей (рис. 16).

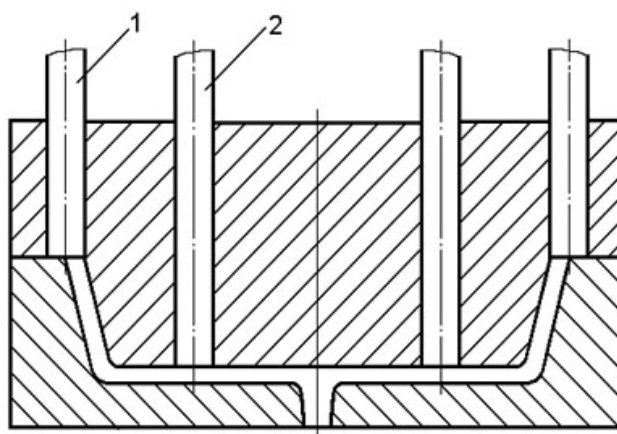


Рис. 16. Схема совмещения функций контрвыталкивателей и выталкивателей:

1, 2 – толкатели

При недостатке места для размещения цилиндрических выталкивателей используют пластинчатые или кольцевые выталкиватели (рис. 17).

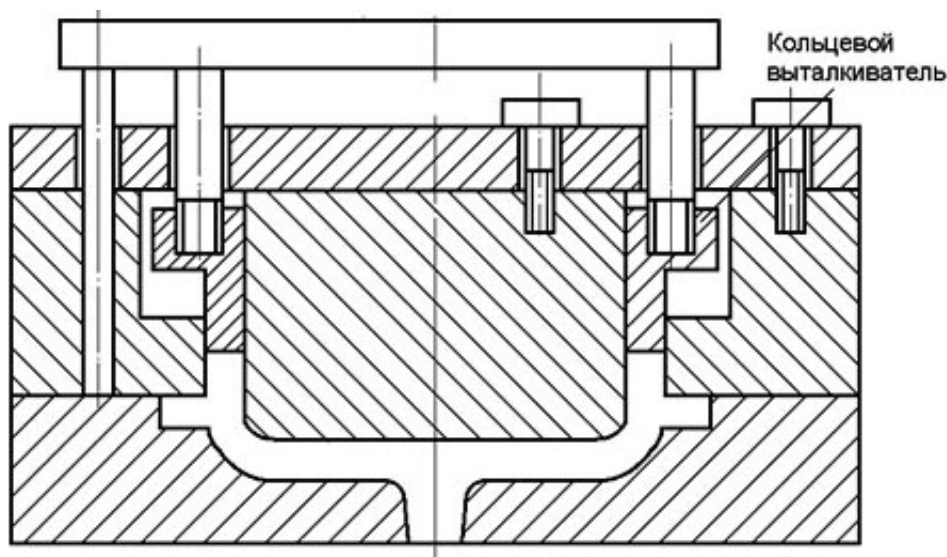


Рис. 17. Схема кольцевого выталкивателя

В современных установках ЛНД применяются системы термостатирования металлических форм. Для обеспечения постоянства температуры формы, а следовательно, и стабилизации тепловых условий формирования отливок предусматривается термостабилизация за счет циркуляции в объеме стенки формы термоорганических жидкостей, чаще всего силиконовых. На рис. 18 приведена схема устройства формы с термостатированием.

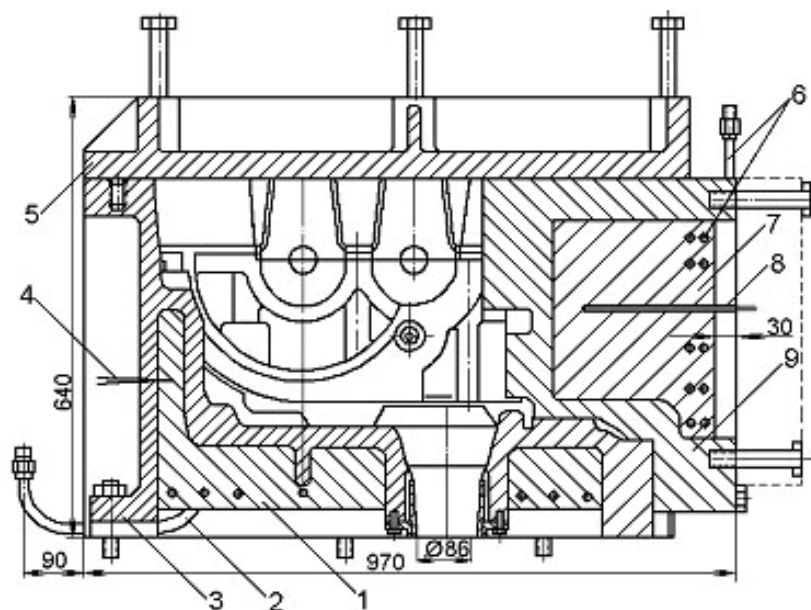


Рис. 18. Схема устройства формы с термостатированием:

1, 7 – теплообменники; 2 – змеевик; 3 – поддон; 4, 8 – термодатчики; 5 – плита;
6 – змеевик в боковой матрице; 9 – боковая матрица

Внутри стенок кокилей предусматриваются специальные теплообменники 1, 7 с каналами 2, 6, по которым протекает охлаждающая жидкость. Температура теплообменников контролируется термopарами 4, 8. Значение температуры охлаждающей жидкости в термостате автоматически поддерживается на уровне, обеспечивающем заданное значение температуры теплообменников. Температура кипения охлаждающей жидкости должна быть выше значения рабочей температуры кокилей, которая, как правило, превышает 200 °С, а при изготовлении тонкостенных отливок из алюминиевых сплавов может составлять 250–300 °С.

В зависимости от требуемой температуры кокиля опытным путем устанавливаются размеры каналов, температура охлаждающей жидкости в термостате и режимы движения жидкости по каналам в теплообменниках.

Термостатирование существенно усложняет конструкцию кокилей и повышает их стоимость. Поэтому на практике установки термостатирования применяются редко. Для предотвращения сильного разогрева кокилей при высоких темпах работы литейной машины предусматривают ребрение наружной поверхности кокилей для увеличения интенсивности их охлаждения.

Каналы охлаждения выполняются в теле формы путем механической обработки. Однако при этом не удастся обеспечить рациональную форму канала при охлаждении форм для отливок сложных конфигураций. Поэтому систему охлаждения выполняют в виде трубок, помещенных в каналы в стенке формы и залитых сплавом-заполнителем. В качестве сплава-заполнителя чаще всего применяют алюминиевый сплав АК12. Перед заполнением форму с установленными в нее трубками охлаждения нагревают до температуры 200–250 °С.

В конструкциях форм необходимо предусмотреть вентиляционные каналы, суммарная площадь сечения которых должна соответствовать расчетным значениям. Для вентиляции глухих полостей следует устанавливать вентиляционные пробки с кольцевыми зазорами (рис. 19). Для достижения герметичности по диаметру D необходимо обеспечить посадку А2а/Пр2ча. Размеры по диаметру d нужно выбирать с гарантированным зазором от 0,1 до 0,2 мм.

При наличии развитых горизонтальных плоскостей при высокой скорости заливки рекомендуется устанавливать вентиляционные кольца (рис. 20). Размеры d_1 и D_1 следует выдерживать с допуском 0,1–0,2 мм.

При проектировании форм для тонкостенных отливок, когда требуются большие скорости заливки, на плоскости разъема необходимо предусмотреть вентиляционные каналы глубиной 0,1–0,2 мм.

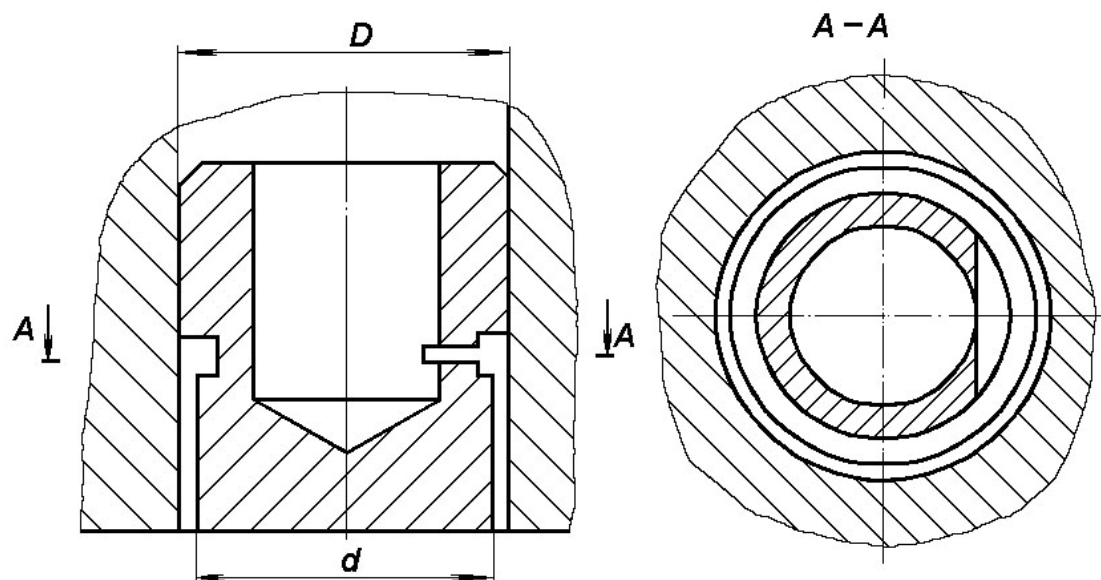


Рис. 19. Схема устройства вентиляционной пробки

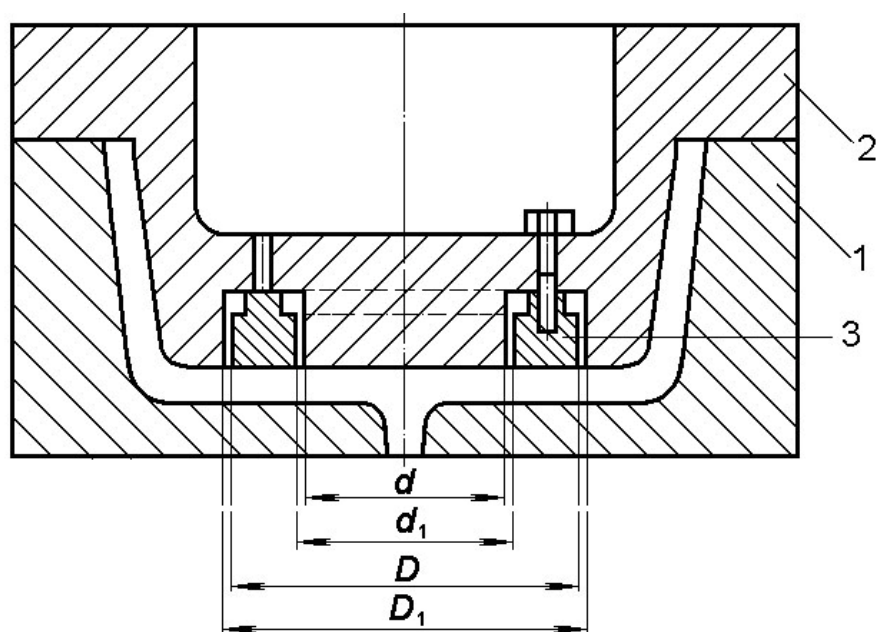


Рис. 20. Схема расположения горизонтального вентиляционного кольца:

1 – нижняя половина формы; 2 – верхняя половина формы;

3 – вентиляционное кольцо

Металлические формы чаще всего изготавливают из серого чугуна марки не ниже СЧ 20 (ГОСТ 1412–85), а для крупных отливок – из высокопрочного чугуна марки не ниже ВЧ 50 (ГОСТ 7293–85). Формы с жидкостным охлаждением изготавливают из сталей 25, 30 и 35 (ГОСТ 1050–74), стержни и выталкиватели – из сталей У7 и У8 (ГОСТ 1435–75) или 30ХГСЛ и 35ХГС (ГОСТ 4543–71). Оснастка должна удовлетворять требованиям, предъявляемым к кокилям по ГОСТ 1621–70, 16246–70, 16249–70, 16237–70, 16250–70 и 16262–70. Зазоры по плоскости разъема не должны превышать 0,2 мм. Выталкиватели и отверстия для них выполняются с посадкой А3/Х3 для предотвращения образования заливов и заклинивания выталкивателей. Шероховатость поверхностей, образующих отливку, литниково-питающую систему и подлежащих окраске, должна соответствовать $Rz = 40$ мкм. Шероховатость поверхностей формы, не подлежащих окраске, должна составлять $Rz = 25$ мкм.

Для уменьшения опасности прорыва жидкого металла по плоскости разъема формы выполняют замок (рис. 21).

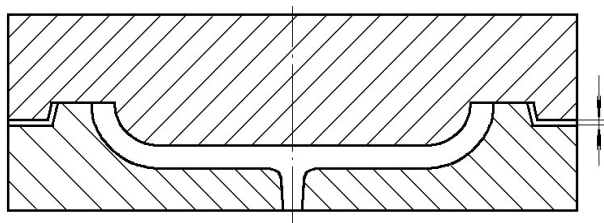


Рис. 21. Схема устройства замка по плоскости разъема формы

Для удаления стержней из отливок применяют клиновые, реечные механизмы или специальные гидроцилиндры. Усилие удаления стержней можно рассчитать по формуле

$$F_{\text{уд}} = f_{\text{тр}} \cdot N_{\text{ст}},$$

где $f_{\text{тр}}$ – коэффициент трения между отливкой и стержнем (для алюминиевых сплавов $f_{\text{тр}} = 0,25$);

$N_{\text{ст}} = P_{\text{ст}} \cdot \omega_{\text{ст}}$ – усилие обжатия стержня, МПа;

$\omega_{\text{ст}}$ – площадь обжатия стержня, м²;

$P_{\text{ст}}$ – давление отливки на стержень (для алюминиевых сплавов),

$P_{\text{ст}} = 17\text{--}40$ МПа.

Меньшие значения принимаются для отливок с толщиной стенки менее 3,5 мм и при уклоне более 4°.

Важным узлом машины литья под регулируемым давлением является металлопровод. Его можно рассматривать также в качестве важного

звена технологической оснастки, так как диаметр металлопровода и его длина оказывают существенное влияние на процессы формирования отливок при ЛРД. Большое значение имеет обеспечение необходимой стойкости металлопровода. Материал металлопровода должен удовлетворять следующим требованиям:

- высокая стойкость в среде расплава;
- герметичность материала в рабочем интервале температур;
- недефицитность материала;
- простота технологии изготовления металлопровода и его эксплуатации.

Выполнение этих требований при литье алюминиевых и особенно медных и железоуглеродистых сплавов проблематично. Поэтому работа по поиску материалов для металлопроводов, а также по созданию их рациональных конструкций интенсивно ведется как в нашей стране, так и за рубежом. Наиболее перспективным является применение металлопроводов из слюдокристаллических материалов типа фторфлогопита. Однако следует отметить их высокую стоимость и сложность технологического процесса изготовления металлопровода и его эксплуатации. Аналогичные проблемы возникают при применении металлопроводов, изготовленных из высокоглиноземистой керамики, асботермосиликата, нитрида и карбида кремния.

При литье алюминиевых сплавов, как правило, применяют металлопроводы из жаростойкого чугуна (3,3–3,5 % С, 2–2,5 % Si, 2,5–3,5 % Cr, 4,5–5,5 % Al, до 0,3 % Р и до 0,1 % S). Перед использованием их необходимо окрашивать краской с жидкостекольным связующим и наполнителем – окисью цинка или алюминия. Применяется обмазка поверхности металлопровода, содержащая 42,5 % глинозема, 49,9 % кремнезема, 0,9 % буры, 0,4 % окиси натрия, 4,7 % окиси магния, 0,8 % двуокиси железа, 0,8 % окиси титана и 0,01 % карбида кальция, а также обмазка на жидком стекле с графитом и молотым кварцем. При использовании окраски и обмазки стойкость чугунных металлопроводов в алюминиевых сплавах достигает 15–16 ч.

Наибольшей стойкостью в алюминиевых сплавах обладают металлопроводы, изготовленные из титанового сплава ВТ 14. После применения специальной термодиффузионной обработки стойкость этих металлопроводов может достигать 2000 ч. Термодиффузионная обработка металлопроводов проводится в электрических или газовых печах, в рабочем пространстве которых располагаются коробка из нержавеющей стали с загруженными в них металлопроводами. Перед обработкой на поверхность металлопровода нано-

сится паста следующего состава, % масс.: голландская сажа – 8, скипидар – 36, технический вазелин – 56. На дно стального короба при подготовке к цементации насыпают слой просушенного карбюризатора толщиной 40–50 мм. Обрабатываемые металлопроводы должны быть со всех сторон засыпаны карбюризатором (толщина слоя не менее 40 мм). Сверху короб закрывают асбестовым листом, и зазоры герметизируют глиной. Нагрев коробов с металлопроводами проводят при температуре 1250 °С. При выдержке в течение 3 ч на поверхности металлопровода формируется защитный термодиффузионный слой толщиной 0,1 мм, а при выдержке в течение 5 ч – 0,2 мм.

При литье железоуглеродистых сплавов металлопроводы выполняются из керамических, чаще всего графитошамотных, труб, а также из высокоглиноземистых или тугоплавких материалов типа боридов и нитридов. Пример сборной конструкции металлопровода для ЛРД железоуглеродистых сплавов приведен на рис. 22.

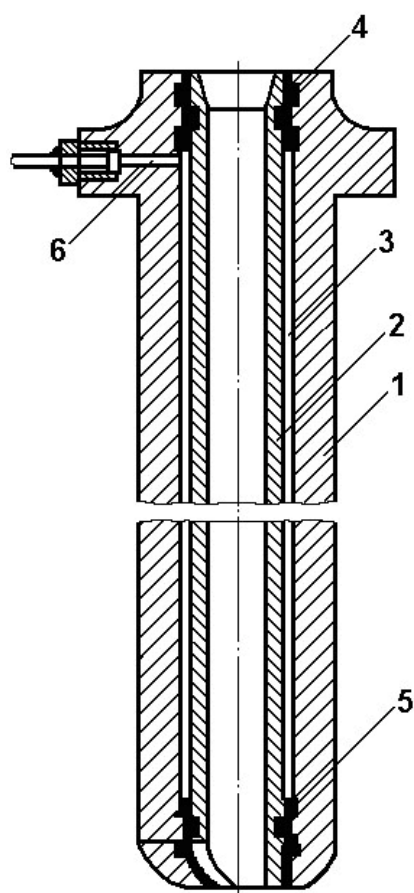


Рис. 22. Металлопровод для установок ЛРД железоуглеродистых сплавов:

- 1, 2 – внешний и внутренний корпуса из карбида кремния, графитошамота или огнеупорного бетона; 3 – зазор; 4, 5 – лабиринтные уплотнения;
6 – канал, соединяющий полость зазора с атмосферой

При литье медных сплавов применяют шамотные, графитошамотные и сборные металлопроводы. Сборный металлопровод представляет собой металлическую трубу, футерованную внутри и снаружи керамическими втулками или обмазкой. При литье оловянных бронз высокой стойкостью обладают стальные металлопроводы, покрытые слоем графитовой краски толщиной 0,3–0,5 мм.

Для предотвращения преждевременного затвердевания сплава в металлопроводе в его верхней части устанавливают теплоизоляционную втулку из асботермосиликата или тонкостенную стальную втулку толщиной 2 мм с образованием воздушного зазора между втулкой и массивной верхней частью металлопровода.

Глава 6. ОСОБЕННОСТИ ОТДЕЛЬНЫХ РАЗНОВИДНОСТЕЙ ЛИТЬЯ ПОД РЕГУЛИРУЕМЫМ ДАВЛЕНИЕМ. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Несмотря на общую природу, отдельные разновидности литья под регулируемым давлением имеют специфические особенности, определяющие их достоинства и недостатки.

Литье под низким давлением. При литье под низким давлением в отличие от ЛВВ и ЛПрД расположенная вверху форма открыта, что позволяет для механизации ее обслуживания применять устройства, используемые в установках кокильного литья. Это является основным фактором, обусловившим более широкое распространение ЛНД по сравнению с другими разновидностями ЛРД. Открытая для обслуживания форма позволяет изготавливать отливки с любой плоскостью разъема формы и при наличии вертикальных и боковых стержней. Имеется возможность после заполнения формы сплавом и отсечки металлопровода от полости формы оказывать повышенное поршневое или газовое давление на затвердевающий расплав. Это повышает плотность отливок и их эксплуатационные свойства.

Для управления характером изменения избыточного давления в тигле в современных установках используют специальные автоматические устройства – пневмоблоки, которые обеспечивают изменение давления в процессе заливки формы и затвердевания отливки как по линейному, так и по

ступенчатому закону. На рис. 23 приведены графики изменения избыточного давления на расплав. На графике, показанном на рис. 23, *а*, избыточное давление в тигле P изменяется в процессе заливки в течение времени τ_1 по линейному закону до величины $P_{\text{зал}}$ и затем до конца затвердевания отливки (τ_3) остается неизменным. На рис. 23, *б* показан ступенчатый график изменения избыточного давления: после образования корочки затвердевшего сплава в течение времени τ_2 избыточное давление увеличивается до значения P_1 , при котором происходит затвердевание отливки. В установках ЛНД избыточное давление изменяется в пределах от 0 до 0,1 МПа.

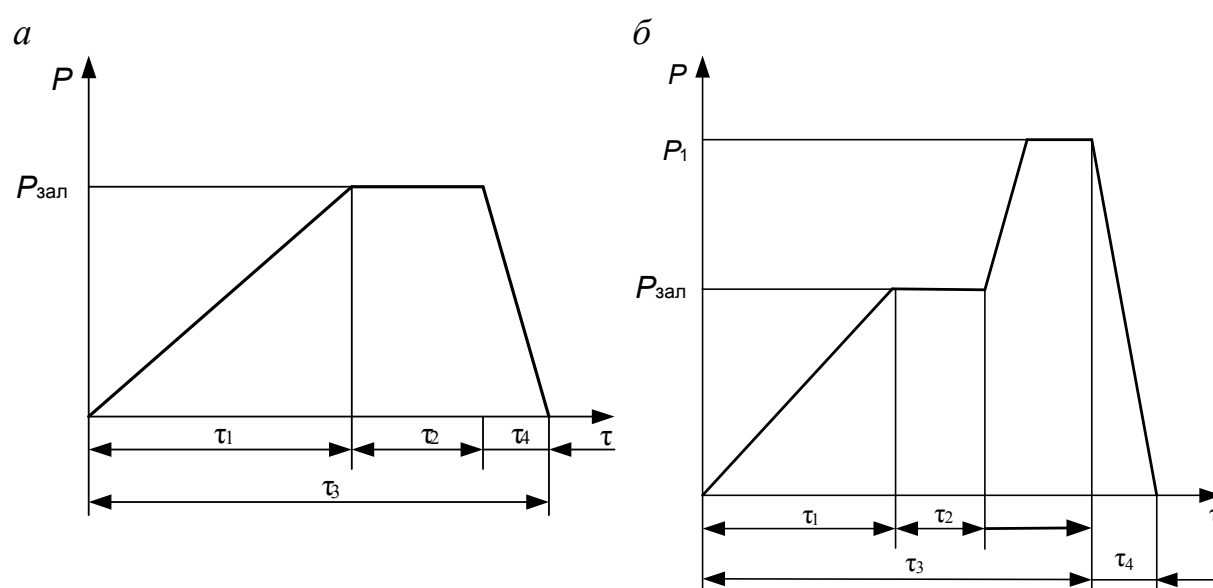


Рис. 23. Линейный (*а*) и ступенчатый (*б*) графики изменения избыточного давления при ЛНД

При ЛНД находящийся внизу установки тигель должен быть герметизирован. Из-за высоких температур обеспечение надежной герметизации проблематично. При достаточной площади вентиляционных каналов в форме давление в полости формы в процессе заливки практически равно атмосферному давлению. Однако при высоких скоростях заливки, необходимых при изготовлении тонкостенных отливок, давление воздуха в полости формы увеличивается и повышается противодействие на движущийся сплав. Поэтому заполняемость форм сплавом для тонкостенных отливок при ЛНД ниже, чем при ЛВВ.

Современные машины ЛНД отличаются высокой степенью механизации и автоматизации всего цикла изготовления отливок, начиная с заполне-

ния формы сплавом и вплоть до извлечения отливки из формы. В последние образцы машин включены встроенные микропроцессоры, обеспечивающие контроль технологических параметров и управление их изменением.

Производство отечественного технологического оборудования для ЛНД было начато в 70-х гг. прошлого века. Известны машины ЛНД моделей 4546С, 4566, 4569, 4646, 4654, 4673, 4188–03МП конструкции Научно-исследовательского института технологии автомобильной промышленности; 59У44, 59У64, 59У66 конструкции Научно-исследовательского института специальных способов литья; АЛУ-1М, АЛУ-03, АЛУГ-3, ЛА-01 конструкции ПО «Точлитмаш» и Института проблем литья Академии наук СССР. Применяются машины ЛНД производства Англии, ФРГ, Италии, Дании и др.

В нашей стране ведущие позиции в области конструирования и изготовления машин ЛНД занимает УралНИТИ. С 1970 г. по настоящее время в этом институте спроектировано несколько серий высокомеханизированных и автоматизированных машин ЛНД. В 1971–1973 гг. в УралНИТИ были изготовлены машины ЛНД-1, ЛНД-2, ЛНД-3, внедренные на Курганском машиностроительном заводе.

На рис. 24 приведена схема машины ЛНД-2. Для установки узлов и деталей машины служит станина, которая представляет собой сварную конструкцию из листового проката. На рабочей поверхности стола станины выполнены Т-образные пазы для установки и крепления поддона кокиля. В центральной части стола имеется отверстие для размещения крышки печи.

В нижней части машины размещена электрическая печь с графитовым или чугунным уравновешенным тиглем емкостью от 100 до 150 кг алюминиевого сплава, предназначенная для хранения и подогрева сплава, поддержания его температуры и выдачи металла по циклу заливки (рис. 25). Печь состоит из корпуса 1, крышки 2, нагревателей 3, тигля 4, крышки 5 и металлопровода 6. Контроль температуры в зоне тигля осуществляется с помощью термопары 8. На корпусе печи смонтированы колеса, позволяющие выкатить ее из рабочей зоны для заполнения тигля сплавом и обслуживания печи. Воздух к тиглю подается через клапан герметизации, который в исходном состоянии соединяет печь с атмосферой.

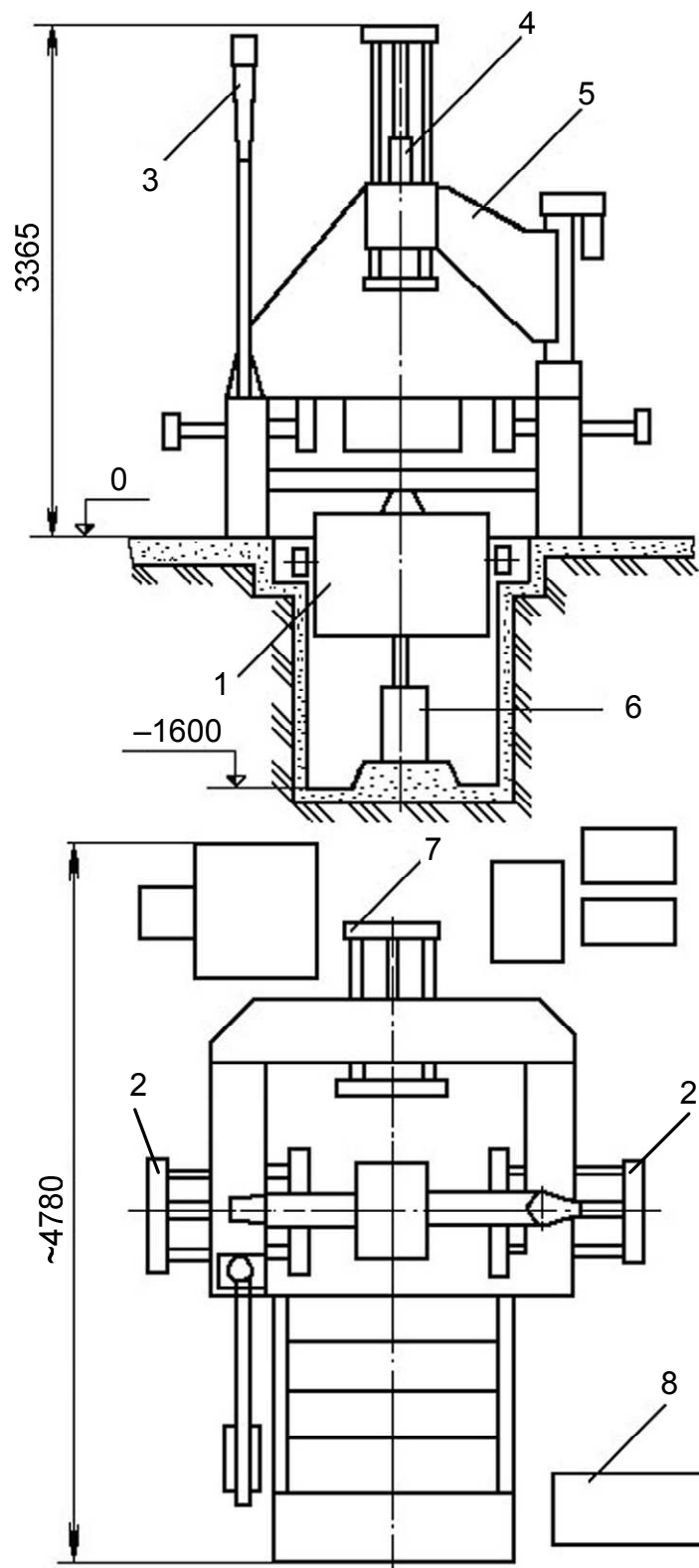


Рис. 24. Схема машины ЛНД-2:

1 – электропечь; 2, 7 – механизмы вертикального разъема формы в двух направлениях;
3 – консольный кран; 4 – механизм горизонтального разъема формы; 5 – поворотная консоль; 6 – гидроцилиндр поджима печи; 8 – пульт управления

В верхней части машины установлены механизмы вертикального и горизонтального разъема формы, осуществляющие разъем формы, а также подрыв и извлечение стержней с помощью гидроцилиндров.

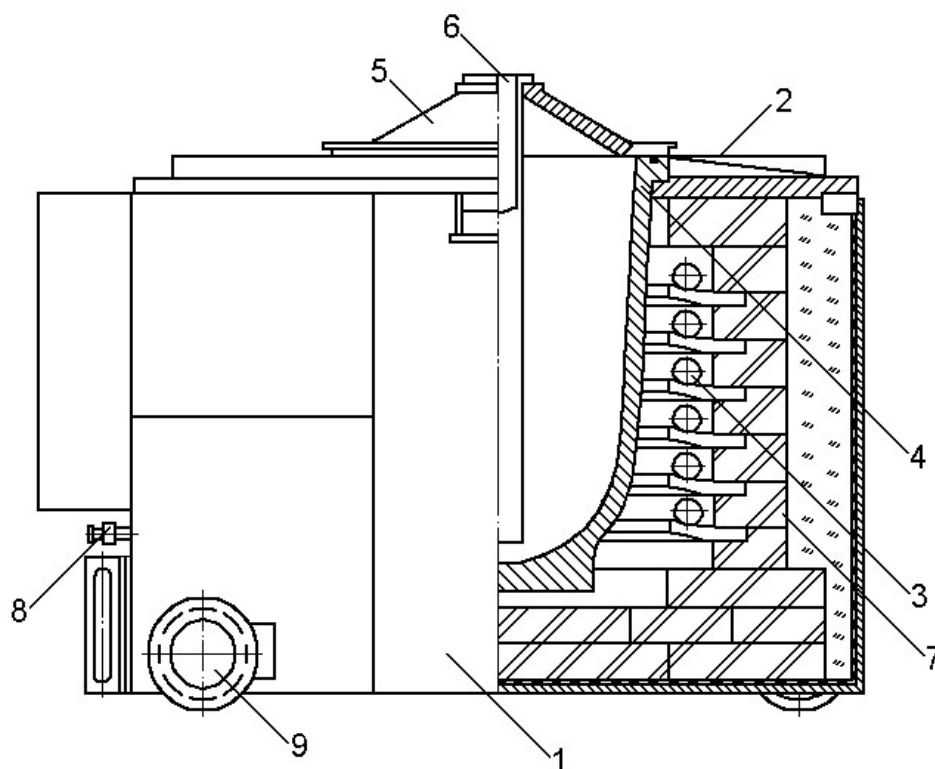


Рис. 25. Схема печи машины ЛНД:

1 – корпус; 2 – крышка печи; 3 – нагреватель; 4 – тигель; 5 – крышка тигля;
6 – металлопровод; 7 – корпус печи; 8 – термopар

В УралНИТИ разработана гамма литейных машин серии ЛАУНД (литейная агрегатная универсальная для литья под низким давлением). Машины выпускаются в трех исполнениях, схемы которых приведены на рис. 26. Машины исполнения 1 (ЛАУНД-11, ЛАУНД-21, ЛАУНД-31) предназначены для работы с кокилями, имеющими горизонтальную плоскость разъема. Машины исполнения 2 (ЛАУНД-12, ЛАУНД-22 и ЛАУНД-32) могут применяться для работы с кокилями с вертикальной плоскостью разъема. Машины исполнения 3 (ЛАУНД-13, ЛАУНД-23, ЛАУНД-214 и ЛАУНД-214М) предназначены для работы с кокилями, имеющими две плоскости разъема. В этих машинах предусмотрена возможность установки двух дополнительных гидроцилиндров для извлечения металлических стержней из отливок.

Типоразмеры машин серии ЛАУНД выбраны исходя из условия возможности работы с кокилями различных размеров. Машины типоразмера 1 предназначены для работы с кокилями, имеющими размеры 250×320 мм и 320×400 мм, при массе отливок до 10 кг (ЛАУНД-11, ЛАУНД-12, ЛАУНД-13).

Машины типоразмера 2 могут применяться для кокилей, имеющих размеры 400×500 мм, 500×630 мм и 630×800 мм, при массе отливок до 30 кг (ЛАУНД-21, ЛАУНД-22, ЛАУНД-23). Машины типоразмера 3 предназначены для работы с кокилями, имеющими размеры 800×1000 мм и 1000×1250 мм, при массе отливок 30 кг и выше (ЛАУНД-31, ЛАУНД-32).

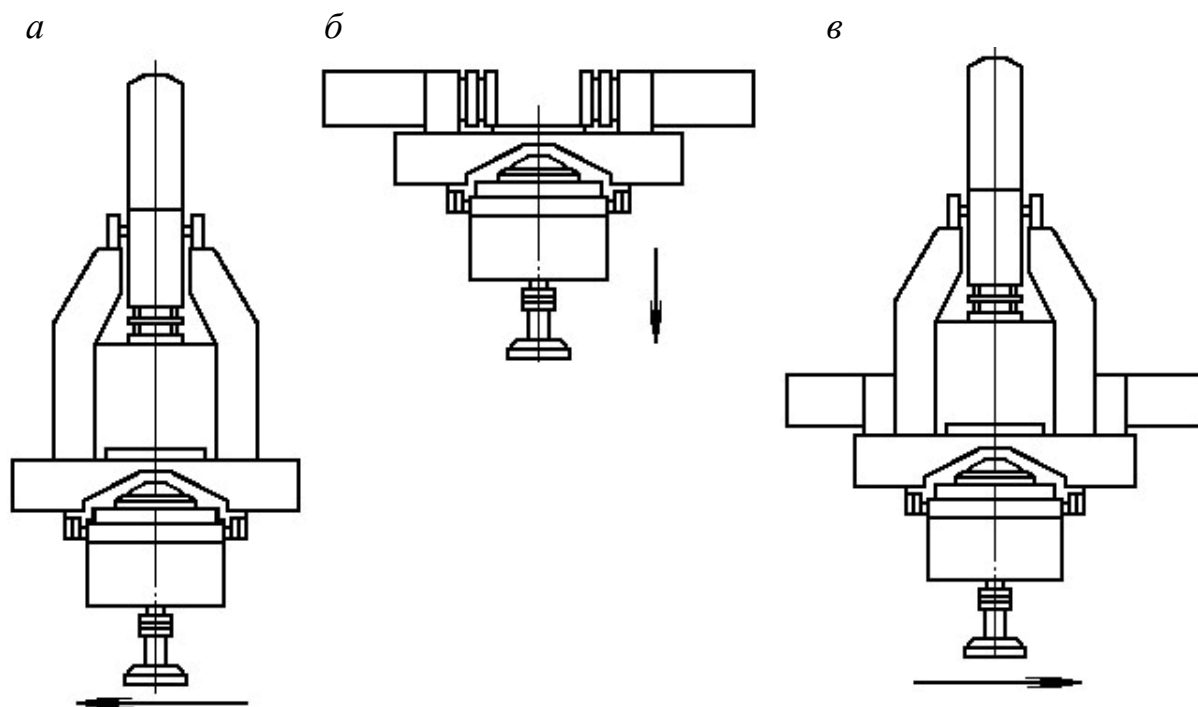


Рис. 26. Схемы исполнения машин серии ЛАУНД:

а – исполнение 1; б – исполнение 2; в – исполнение 3

Машины серии ЛАУНД оснащены агрегатом термостатирования, обеспечивающим нагрев и охлаждение отдельных частей литейной формы для поддержания ее температуры на заданном уровне. Они снабжены консольно-поворотным краном для манипуляций с формой и механической рукой для удаления полученных отливок из рабочей зоны машины. Наиболее совершенными машинами данной серии являются машины ЛАУНД-214 и ЛАУНД-214М.

Литье вакуумным всасыванием. Способ литья вакуумным всасыванием был запатентован в России в начале XX в. В 1949 г. на ряде предприятий были внедрены разработанные уральским профессором Б. М. Ксенофоновым установки по изготовлению отливок из медных сплавов вакуумным всасыванием в водоохлаждаемые кристаллизаторы. Однако развитие ЛРД пошло по пути распространенного за рубежом способа литья под низким давлением.

В отличие от ЛНД при *литье вакуумным всасыванием* форма помещается в герметизированную вакуумируемую камеру, что затрудняет применение используемых при кокильном литье средств механизированного обслуживания форм при вертикальной плоскости разъема. Это обусловило недостаточное внимание к ЛВВ по сравнению с литьем под низким давлением.

Вместе с тем литье вакуумным всасыванием обладает большими преимуществами, особенно при изготовлении сложных тонкостенных отливок. Заполнение формы сплавом осуществляется в условиях вакуумирования полости формы. При этом из-за снижающейся плотности воздуха в полости формы улучшаются условия ее вентиляции, что приводит к повышению заполняемости форм сплавом и обеспечивает качественное заполнение форм для отливок с толщиной стенки 1 мм и менее. Так как тигель с расплавом при этом открыт, облегчаются условия обслуживания печи и рафинирования сплава в процессе заливки форм. Управление заливкой форм на установках ЛВВ осуществляется с помощью дросселирующих устройств (диафрагм) с различной площадью проходного сечения, установленных в вакуумной сети между камерой с формой и ресивером. Разрежение в ресивере при литье алюминиевых сплавов чаще всего равно 66500 Па (500 мм рт. ст.). При этом обеспечивается близкий к линейному закон изменения перепада газового давления на расплав.

Серийное производство технологического оборудования для ЛВВ не организовано. Известна универсальная машина ВМЛ-1500, спроектированная под руководством профессора Н. Н. Белоусова. Однако ввиду наличия ряда конструктивных проблем машина была изготовлена в одном экземпляре и не получила распространения в промышленности.

Большинство конструкций машин ЛВВ создано применительно к работе с песчаными формами и с металлическими формами с горизонтальной плоскостью разъема. Чаще всего данные машины спроектированы и изготовлены силами промышленных предприятий, например машина ЛВВ, разработанная в Межотраслевом научно-исследовательском проектно-технологическом институте автоматизации машиностроения под руководством В. А. Косинцева. В данной машине не предусмотрена механизация разъема формы и удаления отливки. После заливки формы и затвердевания отливки кожух вакуумной камеры поднимается вверх и форма с отливкой переносится на отдельно стоящий кокильный станок. Машина получила применение в автотракторном машиностроении для изготовления колес компрессоров с радиально расположенными лопатками с толщиной стенки 0,7 мм.

В 80-х гг. прошлого века в УралНИТИ была изготовлена машина ВИД-13, спроектированная по техническому заданию, разработанному в Уральском политехническом институте под руководством профессора Б. С. Чуркина. Общий вид машины приведен на рис. 27.

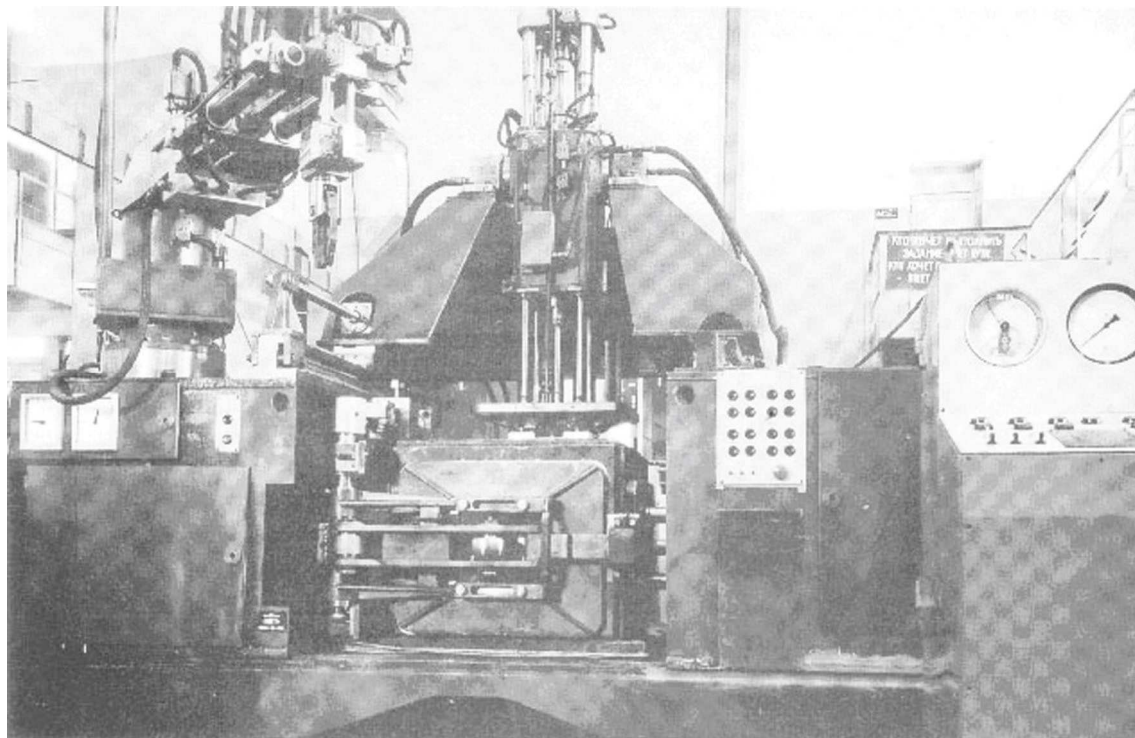


Рис. 27. Общий вид машины ВИД-13

С целью обеспечения механизированного обслуживания металлической формы с вертикальной и горизонтальной плоскостями разъема при наличии металлических стержней в вакуумной камере выполнены прямоугольные проемы на боковых и верхней стенках. При сборке формы эти проемы герметизируются плитами, предусмотренными в механизмах вертикального и горизонтального разъема формы. Машина ВИД-13 имеет высокую степень механизации и автоматизации процесса и снабжена системой термостабилизации формы до температуры 300 °С. Машина опробована в промышленных условиях и полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к машинам ЛВВ.

Для получения отливок в формах с горизонтальной плоскостью разъема при ЛВВ можно использовать серийно изготавливаемые машины ЛПрД, например ВП-1000. Для этого нужно выполнить некоторую модернизацию установки. В систему с машиной ВП-1000 необходимо включить вакуумный ресивер и вакуумный насос. Если дополнительно предусмотреть наличие пневмоблока ЛНД с регулятором, то можно получить универсальную уста-

новку, позволяющую реализовать все разновидности ЛРД и их комбинации, например литье в предварительно вакуумированную форму. Такая установка была создана в Центральном научно-исследовательском институте и опробована при различных режимах литья. Схема установки приведена на рис. 28.

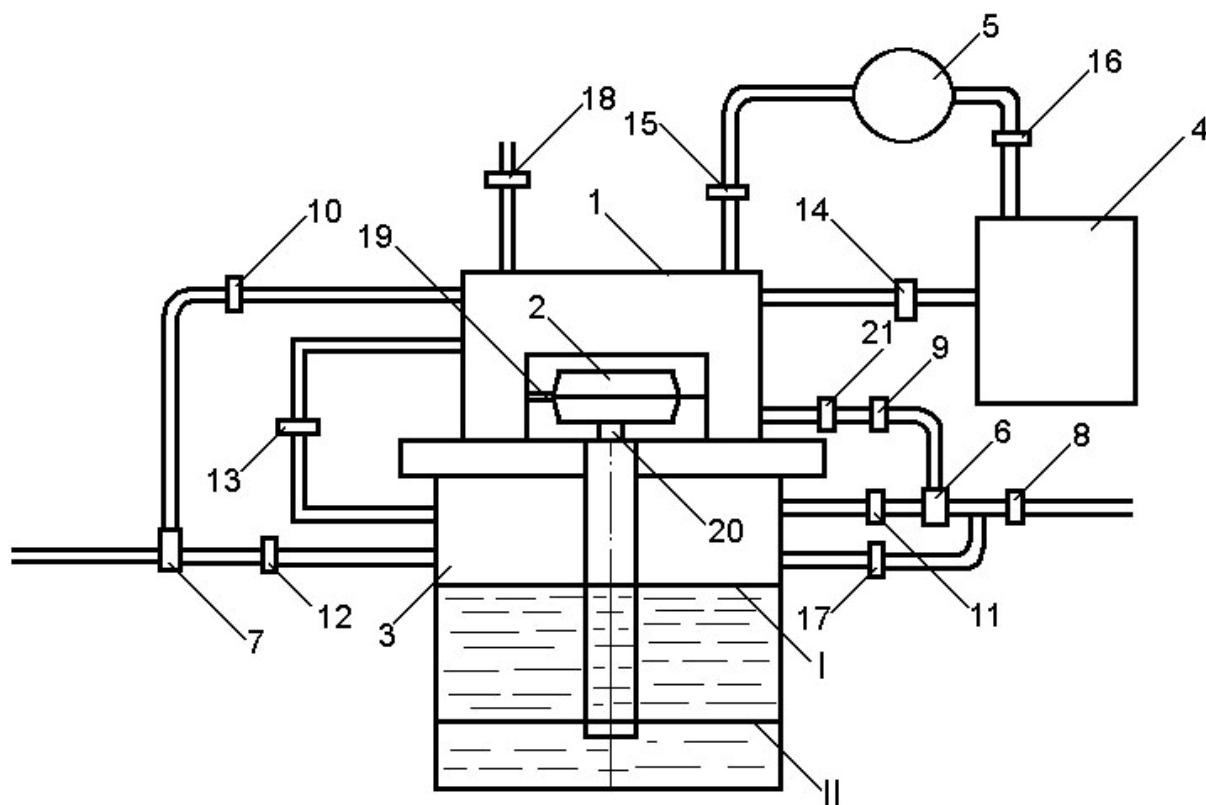


Рис. 28. Схема универсальной машины ЛРД:

1 – кожух; 2 – форма; 3 – герметичная камера; 4 – вакуум-ресивер; 5 – вакуум-насос; 6, 7 – общие клапаны впуска-выпуска; 8 – входной вентиль; 9–12 – клапаны впуска-выпуска воздуха для кожуха и печи; 13 – клапан соединения объемов печи и кожуха; 14, 15 – клапаны соединения кожуха с ресивером и вакуум-насосом; 16 – клапан соединения с вакуум-насосом; 17 – клапан для работы установки под низким давлением; 18 – клапан сброса давления из кожуха; 19 – вентили; 20 – литник; 21 – дублирующий клапан; I, II – максимальный и минимальный уровни расплава в тигле

Литье с противодавлением. В современном виде способ литья с противодавлением разработан болгарскими учеными А. Балевски и И. Димовым. Схема процесса приведена на рис. 3. Его особенностью является то, что тигель с расплавом и форма помещены в герметизированные камеры. Это создает затруднения при обслуживании формы и печи. При механизации обслуживания кокилей возникают те же проблемы, что и при ЛВВ. Преимущества ЛПрД сводятся к тому, что затвердевание отливки происходит под повышенным всесторонним газовым давлением, что приводит

к усилению фильтрационного и суспензионного питания отливки и затруднению выделения газов, растворенных в расплаве. Поэтому обеспечивается высокая плотность и прочность сплава в отливках даже при изготовлении их из широкоинтервальных алюминиевых сплавов.

Обычно при ЛПрД применяют давление 0,4–0,5 МПа, а для отдельных особо ответственных отливок – давление 0,8–1 МПа. Заполнение форм сплавом при ЛПрД осуществляется под действием изменяющегося перепада давлений в пределах до 0,02–0,05 МПа, что характерно для ЛНД и ЛВВ. Регулирование скорости сброса давления в кожухе литейной машины, а следовательно, и скорости заливки формы осуществляется с помощью дросселя, установленного на боковой стенке кожуха. Регулирование происходит путем изменения площади проходного сечения дросселя. В установленных на машинах дросселях площадь изменяется плавно по шкале делений дросселя. Дроссель может иметь 35 или 70 делений.

На рис. 29 приведен график, связывающий число делений при настройке дросселя с соответствующими значениями площади его проходного сечения.

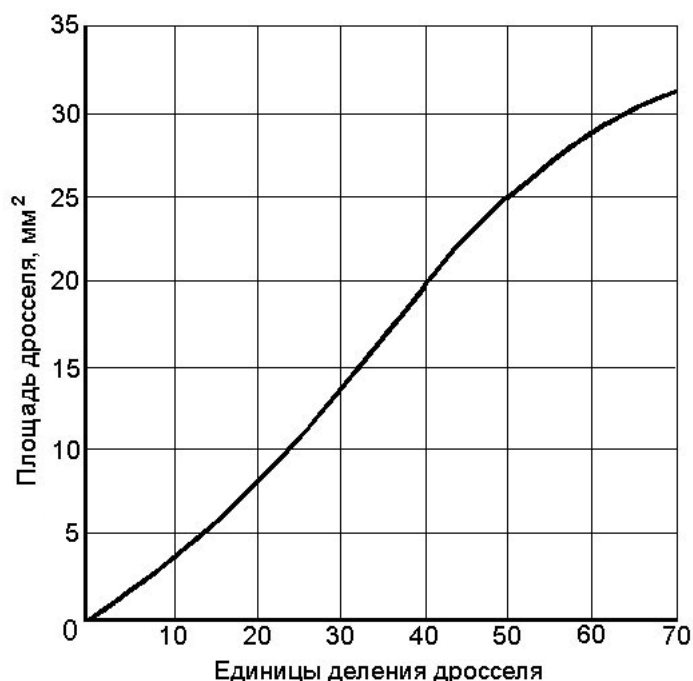


Рис. 29. Градуировочный график

Высокое давление в кожухе машины приводит к повышению теплопроводности и плотности воздуха, что увеличивает скорость затвердевания отливок при ЛПрД на 10–15 % по сравнению с ЛНД. Поэтому машины ЛПрД обладают более высокой производительностью. Однако высокая плотность

воздуха затрудняет вентиляцию форм в процессе их заливки и снижает заполняемость форм сплавом.

Основным оборудованием, применяемым для получения отливок способом ЛПрД, являются машины, изготавливаемые НПО «Технология металлов» (г. Плевен, Болгария). В промышленности используются машины марок ВП-250, ВП-400, ВП-630 и ВП-1000. Цифры в обозначении марок соответствуют диаметру кожуха, в котором размещается форма, в миллиметрах. На рис. 30 показан общий вид машины типа ВП.

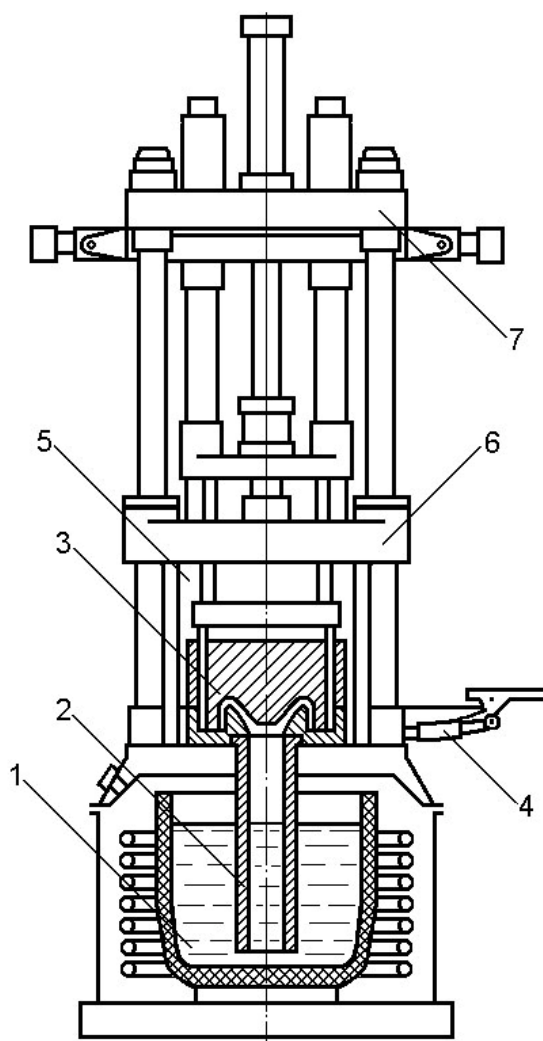


Рис. 30. Общий вид машины типа ВП:

- 1 – печь с расплавом; 2 – металлопровод; 3 – форма; 4 – съемник отливок;
5 – герметичный кожух; 6 – подвижная плита машины;
7 – механизм вертикальных перемещений

Современные машины типа ВП имеют высокоэффективные средства механизации и автоматизации всех этапов технологического процесса из-

готовления отливок. В них предусмотрена возможность реализации ступенчатого закона изменения перепада давлений на расплав в процессе заливки форм сплавом.

Глава 7. ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИИ

Рассмотрев разновидности ЛРД, можно выделить следующие основные технологические параметры, определяющие качество отливок:

- температура сплава в тигле T_T ;
- температура стенок металлической формы перед заливкой сплавом T_ϕ ;
- оптимальная продолжительность $t_{\text{опт}}$ и оптимальная скорость $v_{\text{опт}}$ заливки;
- газодинамические параметры процесса: при ЛВВ – значение разрежения в ресивере ($P_a - P_p$); при ЛПрД – начальное значение избыточного давления в камерах машины ($P_n - P_a$);
- при ЛВВ и ЛПрД – значение газодинамического коэффициента β , обеспечивающего при заливке формы заданное значение $v_{\text{опт}}$; при ЛНД – темп изменения избыточного давления в камере машины при заливке формы m ;
- при ЛВВ и ЛПрД – площадь проходного сечения дросселя в газовой сети ω_d , обеспечивающая расчетное значение коэффициента β ;
- суммарная площадь поперечного сечения вентиляционных каналов формы $\omega_{в.к}$;
- толщина кокильного покрытия на стенках полости формы $\delta_{кр.ф}$;
- место подвода сплава в форме и тип литниково-питающей системы;
- вид и толщина теплоизоляционного покрытия на стенках элементов ЛПС;
- размеры элементов ЛПС.

Последовательность разработки технологического процесса изготовления отливок аналогична применяемой при обычном кокильном литье. Рассмотрим последовательность определения основных технологических параметров при изготовлении отливок из алюминиевых сплавов.

1. *Назначение температуры сплава в тигле T_T .* В зависимости от преобладающей толщины стенки отливки $\delta_{\text{отл}}$ можно рекомендовать следую-

щие значения T_T : при $\delta_{отл}$ меньше 5 мм $T_T = 750^\circ\text{C}$, при $\delta_{отл}$ от 5 до 10 мм $T_T = 725^\circ\text{C}$, при $\delta_{отл}$ больше 10 мм $T_T = 700^\circ\text{C}$.

2. *Назначение температуры стенок формы перед заливкой T_ϕ .* Значение T_ϕ задается в зависимости от $\delta_{отл}$:

- при $\delta_{отл}$ от 1 до 1,5 мм $T_\phi = 250\text{--}300^\circ\text{C}$;
- при $\delta_{отл}$ от 2 до 5 мм $T_\phi = 150\text{--}200^\circ\text{C}$;
- при $\delta_{отл}$ больше 10 мм $T_\phi = 150^\circ\text{C}$.

3. *Определение оптимальной продолжительности $t_{опт}$ и оптимальной скорости $v_{опт}$ заливки.* В первом приближении для определения $v_{опт}$ можно использовать номограмму, приведенную на рис. 14. Для более точного расчета $v_{опт}$ следует применить формулы (33) – (37). При этом необходимо отнести конфигурацию отливки к одному из рассмотренных выше типов. Оптимальная скорость заливки $v_{опт} = H_{отл}/t_{опт}$.

4. *Определение газодинамических параметров процесса.* При ЛВВ разрежение в ресивере принимают равным $P_a - P_p = 66500$ МПа (500 мм рт. ст.). При ЛПрД обычно $P_n - P_a = 0,5$ МПа.

Прежде всего на основе анализа конструкции отливки необходимо определить способ управления заливкой, т. е. решить, есть ли необходимость применения автоматического управления или заливку форм следует проводить при постоянных значениях коэффициента β или m . Далее по формулам (27), или (28), (29), (31), (13), или (30), (32), (14) определяются значения газодинамических характеристик.

5. *Определение площади проходного сечения дросселя в газовой сети при ЛВВ и ЛПрД.* Для расчета площади проходного сечения дросселя при ЛВВ и ЛПрД следует применить формулы (15), (16).

6. *Определение суммарной площади поперечного сечения вентиляционных каналов.* Величину $\omega_{в.к}$ следует определять по формулам (8) – (10).

7. *Назначение толщины кокильного покрытия на поверхности полости формы.* Чаще всего применяется кокильная краска на основе окиси цинка. В зависимости от толщины стенки отливки можно рекомендовать следующие значения $\delta_{кр.ф}$: при $\delta_{отл} < 3$ мм $\delta_{кр.ф} = 0,2$ мм, при прочих условиях $\delta_{кр.ф} = 0,1$ мм.

8. *Выбор типа ЛПС.* При выборе типа ЛПС необходимо обеспечить подвод сплава ко всем термическим узлам отливки (см. рис. 13).

9. *Расчет параметров теплоизоляции и размеров литниковых каналов.* Методика расчета зависит от типа применяемой ЛПС. Рассмотрим ме-

тоды расчета для ЛПС при центральном нижнем подводе сплава через литниковую втулку в верхней части металлопровода и при нижнем рассредоточенном подводе сплава.

Для исключения интенсивного фонтанирования и колебаний уровня сплава при центральном нижнем подводе (см. рис. 13) диаметр литниковой втулки $D_{вт}$ должен удовлетворять условию $D_{вт} = kD_m$, где $1 \geq k \geq 0,7$. Для обеспечения питания отливки через втулку необходимо выполнение условия

$$D_{вт} = 2 \cdot R_0 \cdot \left(0,4 + 4,8 \cdot \frac{\lambda_{кр}}{\delta_{кр}} \right),$$

где $D_{вт}$ – диаметр литниковой втулки, определенный исходя из условий питания отливки, мм;

$\lambda_{кр}$ – коэффициент теплопроводности теплоизоляционной краски на поверхности литника, Вт/см·К;

$\delta_{кр}$ – толщина слоя теплоизоляционной краски, см;

R_0 – приведенная толщина стенки питаемого узла или радиус вписанной в его сечение окружности, мм.

Расчет начинают вести при $\frac{\lambda_{кр}}{\delta_{кр}} = 0,02$, что соответствует краске на основе асбеста с толщиной слоя 0,1 см. Если $D_{вт} > 0,7D_m$, то принимаем диаметр втулки равным $D_{вт}$. Если это условие не выполняется, то принимаем диаметр втулки равным $0,7D_m$ и

$\frac{\lambda_{кр}}{\delta_{кр}} = TK = \frac{\left(\frac{D_{вт}}{2R_0} - 0,4 \right)}{4,8}$. Толщину

слоя краски определяем по формуле $\delta_{кр} = \frac{\lambda_{кр}}{TK}$. Для краски на основе окиси цинка $\lambda_{кр} = 0,0033$ Вт/(см·К), а для асбестовой краски или листового асбеста $\lambda_{кр} = 0,001$ Вт/(см·К).

При нижнем рассредоточенном подводе сплава (см. рис. 13) для расчета размеров литников справедлива формула

$$R_n = R_0 \left(0,51 + 0,013\delta_{отл} + 2,53 \frac{\lambda_{кр}}{\delta_{кр}} \right), \quad (38)$$

где R_n и R_0 – приведенные толщины стенок литника и отливки в зоне подвода сплава, мм;

$\delta_{отл}$ – толщина стенки отливки в зоне подвода, мм.

Приведенная толщина стенки отливки при отношении высоты участка к толщине стенки отливки, большем 5, принимается равной половине толщины стенки отливки, т. е. $R_0 = \frac{\delta_0}{2}$. При меньших значениях отношения

$$R_0 = \frac{S_0}{\Pi_0},$$

где S_0 – площадь вертикального сечения участка отливки в зоне подвода сплава;

Π_0 – периметр этого сечения, по которому расплав контактирует с поверхностью формы и стержней.

Расчет начинают вести при $\lambda_{кр}/\delta_{кр} = 0,33$, что соответствует применению краски на основе окиси цинка с толщиной слоя 0,01 см.

Если рассчитанное по формуле (38) значение R_n удовлетворяет условию $R_n < \delta_0/3$, то величина толщины питателя δ_n принимается равной δ_0 . При невыполнении этого условия необходимо, последовательно на 0,01 уменьшая величину $\frac{\lambda_{кр}}{\delta_{кр}}$, проводить расчеты по формуле (38) до тех пор, пока не будет выполнено указанное условие. Если при снижении $\frac{\lambda_{кр}}{\delta_{кр}}$ до 0,02 данное условие не выполняется, то принимается $\delta_n = 3R_n$.

С учетом расчетного значения R_n длина сечения питателя находится по формуле

$$l_n = \frac{2\delta_n \cdot R_n}{\delta_n - 2R_n}.$$

Определение числа питателей по периметру отливки проводится по формуле

$$N = \frac{L_{отл}}{l_n + 10R_0}.$$

Если расчетное значение $N < 2$, то следует принять $N = 2$.

Если условие $0,6 < \omega_{i+1}/\omega_i < 6$ не выполняется, а также при необходимости более точных расчетов, особенно при сложных ЛПС и оптимальном управлении заливкой форм, следует применять разработанную в Российском государственном профессионально-педагогическом университете под руководством Б. С. Чуркина и А. Б. Чуркина систему автоматизиро-

ванного проектирования технологии для ЛРД (свидетельство Роспатента об официальной регистрации системы № 2003611605 от 4 июля 2003 г.). Описание системы приведено в гл. 8.

Для иллюстрации рассмотрим несколько примеров выполнения расчетов.

Пример 1

Определить основные технологические параметры изготовления отливки «Корпус» (рис. 31) литьем под низким давлением.

Исходные данные: материал отливки – сплав АК7ч; $D_1 = 240$ мм; $D_2 = 200$ мм; $D_0 = 160$ мм; $H_{\text{н}} = 30$ мм; $H_{\text{в}} = 200$ мм; масса отливки $G_{\text{отл}} = 6,7$ кг; высота отливки $H_{\text{отл}} = 24$ см; длина металлопровода $Z_{\text{м}} = 0,8$ м; начальное заглубление металлопровода в расплав $l_0 = 0,4$ м; площадь отливки в нижнем сечении $\omega_{\text{ф}} = 250$ см²; периметр отливки в нижнем сечении $L_{\text{отл}} = 630$ мм; площадь зеркала расплава в тигле $\omega_{\text{т}} = 1256$ см²; толщина отливки в нижнем сечении $\delta_{\text{отл}} = 40$ мм; преобладающая толщина отливки – 20 мм; диаметр металлопровода $D_{\text{м}} = 8$ см; площадь сечения металлопровода $\omega_{\text{м}} = 50$ см²; плотность жидкого сплава $\rho = 2350$ кг/м³.

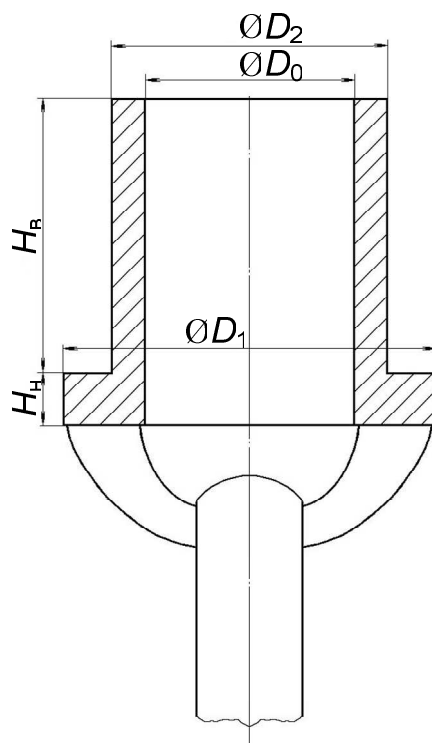


Рис. 31. Отливка «Корпус»

В соответствии с приведенными выше рекомендациями определим основные технологические параметры.

1. Примем температуру сплава в тигле $T_T = 700^\circ\text{C}$, а температуру формы перед заливкой – $T_\phi = 150^\circ\text{C}$.

2. По формуле (35) вычислим значение $t_{\text{опт}}$:

$$X_1 = (20 - 15)/5 = 1, X_2 = 0, X_3 = (700 - 725)/25 = -1;$$

$$t_{\text{опт}} = 3,74 + 1,4 - 0,5 - 0,1 \cdot 1 = 4,14 \text{ с};$$

$$v_{\text{опт}} = H_B / t_{\text{опт}} = 20 / 4,14 = 5 \text{ см/с} = 0,05 \text{ м/с}.$$

3. Темп изменения избыточного давления в камере машины определим по следующим формулам:

$$m = M_\phi \cdot v_{\text{опт}} \cdot \rho \cdot g,$$

$$M_\phi = 1 + 250/(1256 - 50) = 1,28;$$

$$m = 1,28 \cdot 0,05 \cdot 2350 \cdot 9,8 = 1475 \text{ Па/с}.$$

4. По формуле (9) найдем площадь сечения вентиляционных каналов в форме:

$$\omega_{\text{в.к}} = 1475 \cdot 250 \cdot 10^{-4} / (30,2 \cdot 2350 \cdot 9,8) = 5,3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 = 53 \text{ мм}^2.$$

5. В качестве кокильного покрытия для полости формы выберем краску на основе окиси цинка ($\lambda_{\text{кр}} = 0,0033 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$) при толщине покрытия $\delta_{\text{кр}} = 0,01 \text{ см}$.

6. Для организации заливки формы примем нижнюю рассредоточенную ЛПС при подводе сплава через несколько отходящих от металлопровода литников.

Приведенная толщина стенки отливки в зоне подвода сплава равна $R_0 = 30 \cdot 40 / (2 \cdot 30 + 40 + 20) = 10 \text{ мм}$. По формуле (38), приняв $\lambda_{\text{кр}}/\delta_{\text{кр}} = 0,33 \text{ Вт/(см}^2 \cdot \text{К)}$, определим $R_n = 10 \cdot (0,51 + 0,013 \cdot 40 + 2,53 \cdot 0,33) = 18,7 \text{ мм}$. $R_n = 18,7 > 40/3 = \frac{\delta_{\text{отл}}}{3} = 13,33$. Поэтому следует уменьшить $\lambda_{\text{кр}}/\delta_{\text{кр}}$. Разрешив (38) относительно $\lambda_{\text{кр}}/\delta_{\text{кр}}$, получим

$$\lambda_{\text{кр}}/\delta_{\text{кр}} = \frac{\frac{R_n}{R_0} - 0,51 - 0,013 \cdot \delta_{\text{отл}}}{2,53}.$$

Приняв $R_n = 13,33$, по данной формуле получим $\lambda_{\text{кр}}/\delta_{\text{кр}} = 0,12$. Следует применить краску на основе окиси цинка с толщиной слоя $\delta_{\text{кр}} = 0,0033/0,12 = 0,025 \text{ см} = 0,25 \text{ мм}$. Толщина литника $\delta_{\text{л}} = \delta_{\text{отл}} = 40 \text{ мм}$.

Ширина питателя $l_{\pi} = 2 \cdot 40 \cdot 13,3 / (40 - 2 \cdot 13,3) = 79,4$. Примем $l_{\pi} = 80$ мм. Число питателей $N = 630 / (80 + 10 \cdot 10) = 3,5$. Примем 4 питателя. Таким образом, литниковая система включает в себя четыре литника сечением 40×80 мм. Толщина слоя теплоизоляционной краски на основе окиси цинка $\delta_{кр} = 0,25$ мм.

У данной отливки отношение площадей верхнего и нижнего сечений равно $113/250 = 0,45 < 0,6$. Поэтому для эффективной организации заливки формы желательно применить оптимальное управление заливкой, т. е. нижнюю и верхнюю части полости формы заливать при разных темпах изменения избыточного давления в камере машины.

Пример 2

Определить технологические параметры изготовления отливки «Корпус» (см. рис. 31) при литье вакуумным всасыванием. Исходные данные для расчета приведены выше.

Специфика ЛВВ предполагает расчет газодинамического коэффициента β , площади дросселирующего устройства ω_d и площади сечения вентиляционных каналов $\omega_{в.к.}$. Остальные технологические параметры имеют те же значения, что и при ЛНД.

Найдем значение коэффициента β :

$$\beta = 1,28 \cdot 0,05 \cdot 2350 \cdot 9,8 / 66500 = 0,022 \text{ с}^{-1}.$$

По формуле (15) вычислим при объеме камеры $V_k = 0,1 \text{ м}^3$

$$\omega_d = 0,022 \cdot 66500^{0,79} \cdot 0,1 / 1,33 = 10,7 \text{ мм}^2.$$

По формуле (8) рассчитаем площадь вентиляционных каналов:

$$\omega_{в.к.} = 66500 \cdot 0,022 \cdot 250 \cdot 10^{-4} / (31,8 \cdot 2350 \cdot 9,8) = 4,9 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 = 49 \text{ мм}^2.$$

Пример 3

Определить технологические параметры изготовления отливки «Корпус» (см. рис. 31) методом литья с противодавлением.

Примем $P_n - P_a = 500000$ Па и объем верхней камеры $V_k = 0,25 \text{ м}^3$.

Найдем значение газодинамического коэффициента $\beta = 1,28 \cdot 0,05 \times \times 2350 \cdot 9,8 / 500000 = 0,0029 \text{ с}^{-1}$. Площадь дросселя вычислим по формуле (16):

$$\omega_d = (0,0029 \cdot 0,25)^{0,94} \cdot 500000^{0,285} / 0,0108 = 4,3 \text{ мм}^2.$$

Это соответствует 12 делениям шкалы настройки дросселя (см. рис. 29). По формуле (10) рассчитаем площадь вентиляционных каналов:

$$\omega_{в.к} = 500000 \cdot 0,0029 \cdot 250 \cdot 10^{-4} \cdot (600000/100000)^{0,5} / (31,8 \cdot 2350 \cdot 9,8) = 12 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 = 120 \text{ мм}^2.$$

Значения остальных параметров такие же, как при ЛНД.

Глава 8. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА РАСЧЕТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Результаты теоретических исследований и полученные зависимости положены в основу разработанной системы автоматизированного определения технологических параметров при ЛРД.

В ходе разработки технологического процесса изготовления отливки предлагается рассмотренная ниже последовательность работы технолога, которая включает все основные этапы определения параметров заполнения формы сплавом, литниково-питающих систем и организации питания отливки.

8.1. Последовательность определения параметров заполнения формы и формирования отливки

8.1.1. Анализ конструкции отливки

Первым и наиболее творческим этапом является анализ конструкции отливки. При этом технолог должен решить вопрос об отнесении отливки к одному из рассмотренных выше типов:

1. *Отливка типа плиты вертикальной протяженности.* Расплав при заполнении формы движется преимущественно кверху. Отливка данного типа геометрически может не являться плитой и не иметь постоянную толщину стенки. Однако перепад площадей поперечного сечения по высоте отливки не должен превышать 30 %. Отливка может иметь усложнения конфигурации в виде бобышек, фланцев и других элементов. В целом для нее характерна некоторая преобладающая по высоте толщина стенки. Примеры промышленных отливок данного типа приведены в приложении (рис. 1 и 2).

2. *Отливка типа плиты горизонтальной протяженности.* При заполнении формы преимущественно происходит растекание расплава. Характер-

ным для отливки данного типа является значительное (более чем в 5–10 раз) превышение длины над высотой (толщиной стенки). Перепады толщин стенок в горизонтальном направлении не должны превышать 30–50 %. Отливка также может содержать различные усложнения конфигурации. Примеры отливок данного типа приведены в приложении (рис. 3, 4).

3. *Отливка типа полого цилиндра.* К данному типу относятся отливки, имеющие протяженное по высоте замкнутое поперечное сечение, ограниченное снаружи и изнутри металлической формой или стержнями. Сюда можно отнести корпусные отливки, полые цилиндры и т. п. Перепад толщин стенок отливок по высоте не должен превышать 40 %. Примеры отливок данного типа приведены в приложении (рис. 5 – 7).

4. *Комбинации отливок указанных выше типов.* Примеры конструкций подобных отливок приведены в приложении (рис. 8, 9).

5. *Отливки, которые трудно отнести к рассмотренным выше типам.*

При пользовании системой расчетов необходимо задать следующие значения идентификатору конфигурации отливки II : $II = 1$ для отливки типа плиты вертикальной протяженности; $II = 2$ для отливки типа плиты горизонтальной протяженности; $II = 3$ для отливки типа полого цилиндра; $II = 4$ для отливки, представляющей собой комбинацию отливок указанных типов; $II = 5$ для отливки, тип которой определить затруднительно.

В случае, если отливка представляет собой комбинацию отливок нескольких типов ($II = 4$), необходимо указать число участков по высоте отливки III , отвечающих отдельным типам в комбинации, и привести перечень идентификаторов соответствующих типов в направлении снизу вверх $to [I]$, $I = 1 + III$. Например, отливка представляет собой комбинацию расположенной внизу плиты горизонтальной протяженности и полого цилиндра. Указываем $II = 4$, $III = 2$, $to [1] = 2$, $to [2] = 3$.

Как показали исследования, если при заполнении формы имеет место сужение потока более чем на 40 %, для обеспечения качественного заполнения необходимо применять оптимальное управление заливкой, т. е. отдельные элементы полости формы заполнять при разных темпах изменения перепада давления на расплав. При этом отношение площадей сечений (вышележащего и нижележащего) меньше 0,6. У технологичных отливок, когда конструкция обеспечивает затвердевание сплава по направлению к металлопроводу, таких участков резкого сужения потока может быть несколько.

При анализе конфигурации отливки указывается число участков по высоте отливки III , разделенных местами резкого сужения площадей поперечного сечения (более чем на 40 %), и типы конфигурации участков, лежащих ниже и выше места сужения потока, $to [I]$.

8.1.2. Определение характерных геометрических размеров отливки

Для отливок типа плиты вертикальной протяженности ($II = 1$) и полого цилиндра ($II = 3$) необходимо определить по чертежу отливки следующие характеристики:

- Soh – площадь нижнего сечения отливки, $см^2$;
- dh – толщина стенки или диаметр вписанной в нижнее сечение окружности, мм;
- mgo – масса отливки, кг;
- HO – высота отливки, мм;
- dp – преобладающая толщина стенки отливки, мм;
- SOM – наибольшая площадь поперечного сечения, $см^2$;
- ns – число отливок.

Если в отливке есть участки резкого сужения сечения ($S_{i+1}/S_i < 0,6$), то следует задать число таких участков $III > 1$). В этом случае необходимо определить следующие характеристики:

- $to [I] = II$ – индекс типа конфигурации каждого участка;
- Soh – площадь нижнего сечения отливки, $см^2$;
- dh – толщина стенки или диаметр вписанной в нижнее сечение окружности, мм;
- mgo – масса отливки, кг;
- $h [I]$ – высота каждого участка, мм;
- $dd [I]$ – преобладающая толщина стенки каждого участка, мм;
- $S [I]$ – наибольшая площадь сечения каждого элемента;
- ns – число отливок.

Для отливки типа плиты горизонтальной протяженности ($II = 2$) следует задать, кроме указанных выше характеристик, длину отливки $loot$ (при $III = 1$) или длины отдельных участков $l [I]$ (при $III > 1$), представляющие собой наибольшие расстояния от оси металлопровода до края отливки или ее участка.

Для отливки комбинированной конфигурации ($II = 4$) необходимо задать количество участков разных конфигурационных типов (III) и соответствующие геометрические характеристики для каждого участка.

Для отливки, которую затруднительно отнести к какому-либо типу ($II = 5$), задаются те же характеристики, что и для отливки типа плиты вертикальной протяженности. Если в отливке есть участки с резким сужением сечений ($III > 1$), дополнительно задают массу каждого участка отливки m_g [Л].

8.1.3. Расчет продолжительности и скорости заливки полости формы

В программе расчет продолжительности и скорости заливки полости формы выполняется автоматически с использованием формул, приведенных в гл. 3.

8.1.4. Расчет газодинамических параметров заливки форм

При литье под низким давлением рассчитывается темп изменения избыточного давления m , Па/с, а при литье вакуумным всасыванием – значение газодинамического коэффициента β , определяемого площадью проходного сечения включенного в вакуумную сеть дросселя.

В случае, если заполнение формы проходит при β или m , больших некоторых критических значений, металлопровод и форма заполняются при разных значениях β или m . Заполнение участков формы, разделенных сужением потока, большим 40 %, также осуществляется при разных значениях β или m . Тип управления (при разных или одинаковых темпах), а также необходимые значения β или m определяются автоматически по формулам, приведенным в гл. 2.

8.1.5. Расчет параметров системы при управлении процессом с помощью дросселирующих устройств

Автоматически по рассчитанным значениям β определяются соответствующие значения площадей дросселирующих устройств.

При заливке с переменным темпом изменения перепада давлений автоматически выполняется расчет времени смены дросселирующих устройств с разными проходными сечениями. Так как уровень сплава в тигле при каждой заливке понижается, эти величины рассчитываются для каждой по порядку заливки. Для этого должно быть задано число заливаемых отливок и их масса.

8.1.6. Выбор места подвода литниково-питающей системы и ее типы

Наиболее рациональным является подвод сплава непосредственно из металлопровода или через установленную в нем литниковую втулку. В данном случае достигается наивысший выход годного. Однако при изготовле-

нии отливок коробчатого типа, типа полого цилиндра, протяженной в горизонтальном направлении плиты возникает необходимость рассредоточенного по периметру отливки подвода сплава. При этом в случае постоянной по периметру отливки площади поперечного сечения осуществляется равномерное распределение по периметру одинаковых питателей. Если в нижнем сечении отливки имеются ярко выраженные термические узлы, то питатели подводятся к каждому такому узлу.

Если термический узел в отливке находится сбоку в нижнем ее сечении или необходимо заполнить две отливки, находящиеся в форме, то следует осуществить нижний боковой подвод сплава. В случае расположения термических узлов на некоторой высоте отливки литники подводятся к ним от общего стояка, отходящего от металлопровода, или через вертикально-щелевую литниковую систему, которую целесообразно применять также при заливке протяженных тонкостенных отливок.

8.1.7. Расчет параметров литниково-питающих систем

Расчет параметров литниково-питающих систем осуществляется автоматически. Для выполнения расчета необходимо ввести характерные для каждого типа ЛПС данные в соответствии с запросами программы на дисплее.

При рассредоточенном нижнем и боковом подводе сплава (ЛПС типов $JJ = 2$ и $JJ = 3$) вводятся следующие данные:

- LOT – периметр нижнего сечения отливки, мм;
- rot – приведенная толщина стенки отливки в зоне подвода сплава, мм;
- ht – высота элемента отливки в зоне подвода сплава, мм.

При боковом нижнем подводе сплава (ЛПС типа $JJ = 4$) нужно ввести следующие данные:

- hh – высота элемента отливки в зоне питателя, мм;
- ly – ширина теплового узла отливки в месте подвода сплава, мм;
- rot – приведенная толщина термического узла отливки, мм.

При боковом подводе сплава к термическому узлу отливки, расположенному на некотором расстоянии от низа отливки (ЛПС типа $JJ = 5$), дополнительно вводятся следующие данные:

- rot – приведенная толщина стенки термического узла, мм;
- ht – высота термического узла, мм;
- bty – ширина термического узла, мм;
- hs – высота стояка, мм.

При подводе сплава на двух уровнях (ЛПС типа $JJ = 6$) необходимо предварительно определить и ввести в компьютер следующие данные:

- $ro1$ и $ro2$ – приведенная толщина стенок нижнего и верхнего термического узла, мм;
- $ht1$ и $ht2$ – высота нижнего и верхнего термического узла, мм;
- $bt1$ и $bt2$ – ширина нижнего и верхнего термического узла, мм;
- hs – высота стояка, мм.

При применении вертикально-щелевой ЛПС ($JJ = 7$) нужно ввести следующие данные:

- $T10$ – температура заливки, °C;
- hss – высота литниковой щели, мм;
- hs – высота стояка, мм;
- rot – приведенная толщина стенки термического узла отливки, мм.

Автоматически рассчитываются размеры питателей, при необходимости – размеры стояка и число питателей, а также определяются тип кокильного покрытия и его толщина.

8.1.8. Расчет оптимальных параметров металлической формы для стабилизации ее теплового режима

При отсутствии термостабилизации формы ее температура перед каждой очередной заливкой меняется в зависимости от принятого темпа работы литейной машины, толщины стенки и массы отливки. При этом изменяются тепловые условия формирования отливки и ее механические свойства.

При высоком темпе работы машины форма и стержни сильно нагреваются, что обуславливает необходимость останавливать работу и снижает производительность. В соответствующих блоках расчетной программы определяются значения температуры формы перед первой заливкой, толщины стенки формы и степень оребрения ее наружной поверхности, обеспечивающие стабилизацию тепловых условий работы формы при колебаниях эксплуатационных свойств последовательно изготавливаемых отливок, не превышающих 15–20 %. Под степенью оребрения наружной поверхности формы понимается отношение площади поверхности с учетом ребер к площади поверхности без учета ребер.

Для выполнения расчетов по требованию программы необходимо ввести значения преобладающей по массе толщины стенки отливки, пре-

дела прочности, относительного удлинения сплава в отливке и число изготовляемых в час отливок. Расчет выполняется при отсутствии термостабилизации (индекс $ITR = 0$). Если есть термостабилизация, то вводится значение индекса $ITR = 1$. При отсутствии термостабилизации необходимо задать требования по прочности и пластичности сплава в отливке.

8.1.9. Вывод данных на печать

После выполнения расчетов на печать выводятся следующие данные:

- время заливки формы или наиболее тонкостенного элемента отливки;
- газодинамические характеристики процесса заполнения формы;
- при управлении с помощью дросселирующих устройств – значения диаметров применяемых диафрагм;
- в случае заполнения формы при разных темпах изменения перепада давлений – время изменения темпа или время переключения диафрагм либо темп изменения перепада давлений;
- геометрические размеры ЛПС;
- характеристики теплоизоляционного покрытия в ЛПС и полости формы;
- начальная температура формы T_{20} , степень оребрения наружной поверхности формы P и относительная толщина стенки формы $DF = \delta_{\text{ф}}/\delta_{\text{отл}}$ при отсутствии термостабилизации формы.

8.1.10. Структура компьютерной программы

Для реализации системы автоматизированного расчета технологических параметров разработана программа на языке Борланд – Паскаль. Блок-схема программы приведена на рис. 32. Блок-схема оптимизации теплового режима металлических форм показана на рис. 33. Этот блок реализуется при охлаждении кокилей в естественных условиях (без термостабилизации).

Для начала работы с системой необходимо ввести значение индекса применяемого способа литья JJJ . При ЛВВ $JJJ = 1$, при ЛНД $JJJ = 3$. Далее требуется ввести следующие данные: 1) площадь зеркала расплава в тигле St , см²; 2) диаметр металлопровода Dm , см; 3) длина металлопровода Zm , м; 4) длина начального заглубления металлопровода в расплав в тигле l_0 , м. При ЛВВ нужно ввести объем вакуумной камеры.

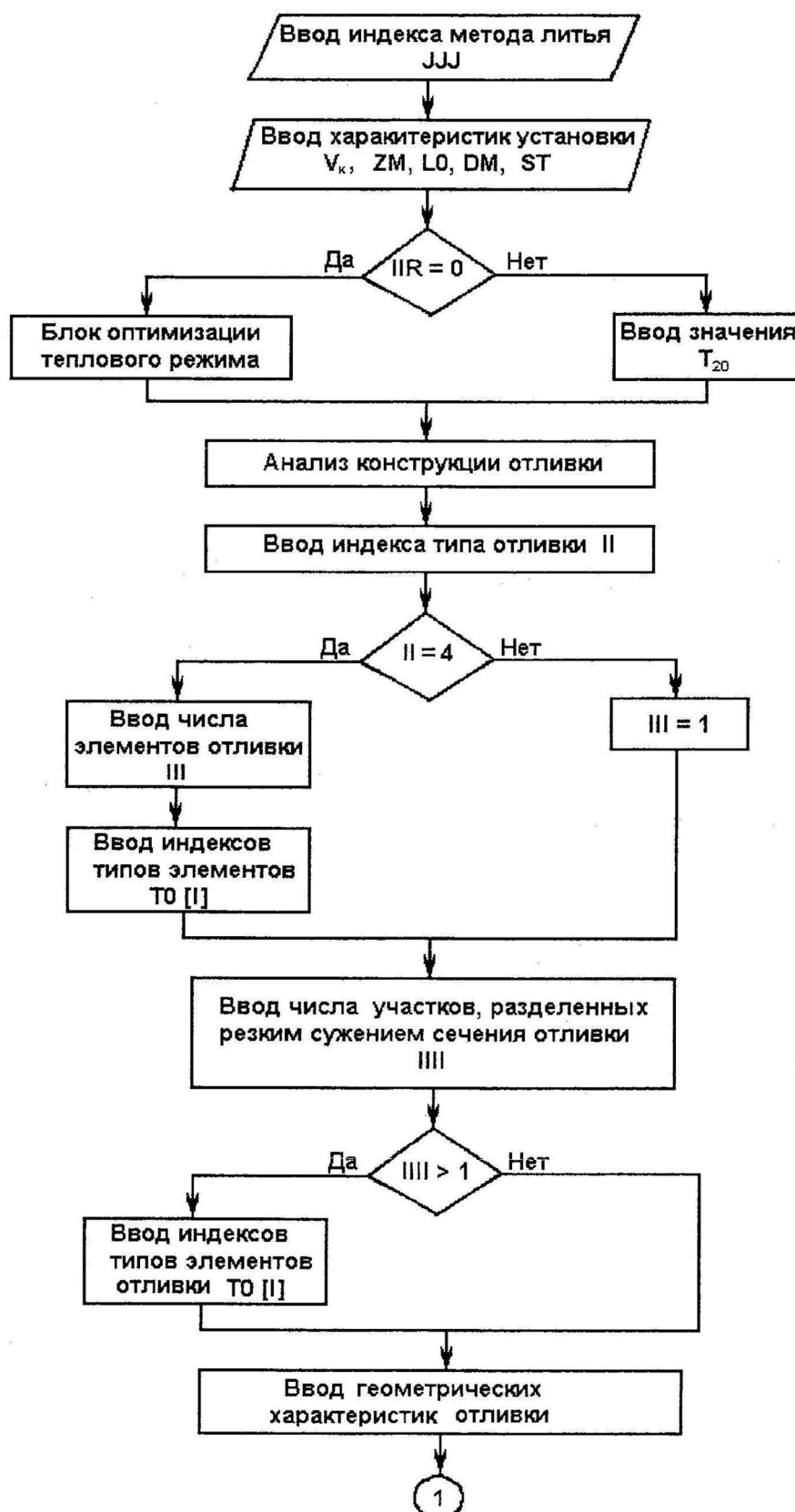


Рис. 32. Блок-схема программы автоматизированного расчета технологических параметров при ЛРД



Рис. 32. Окончание

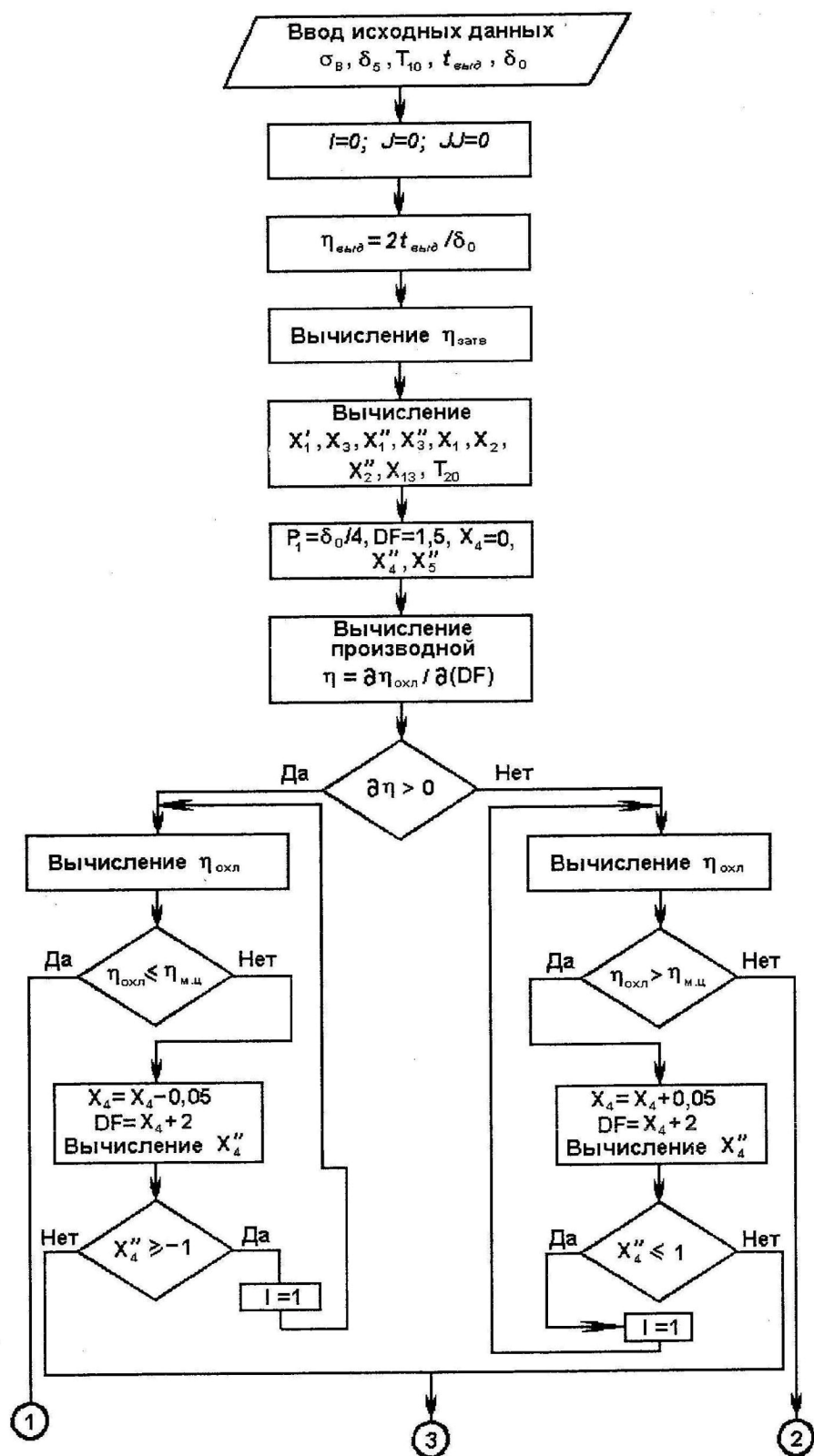


Рис. 33. Блок-схема программы оптимизации теплового режима формы

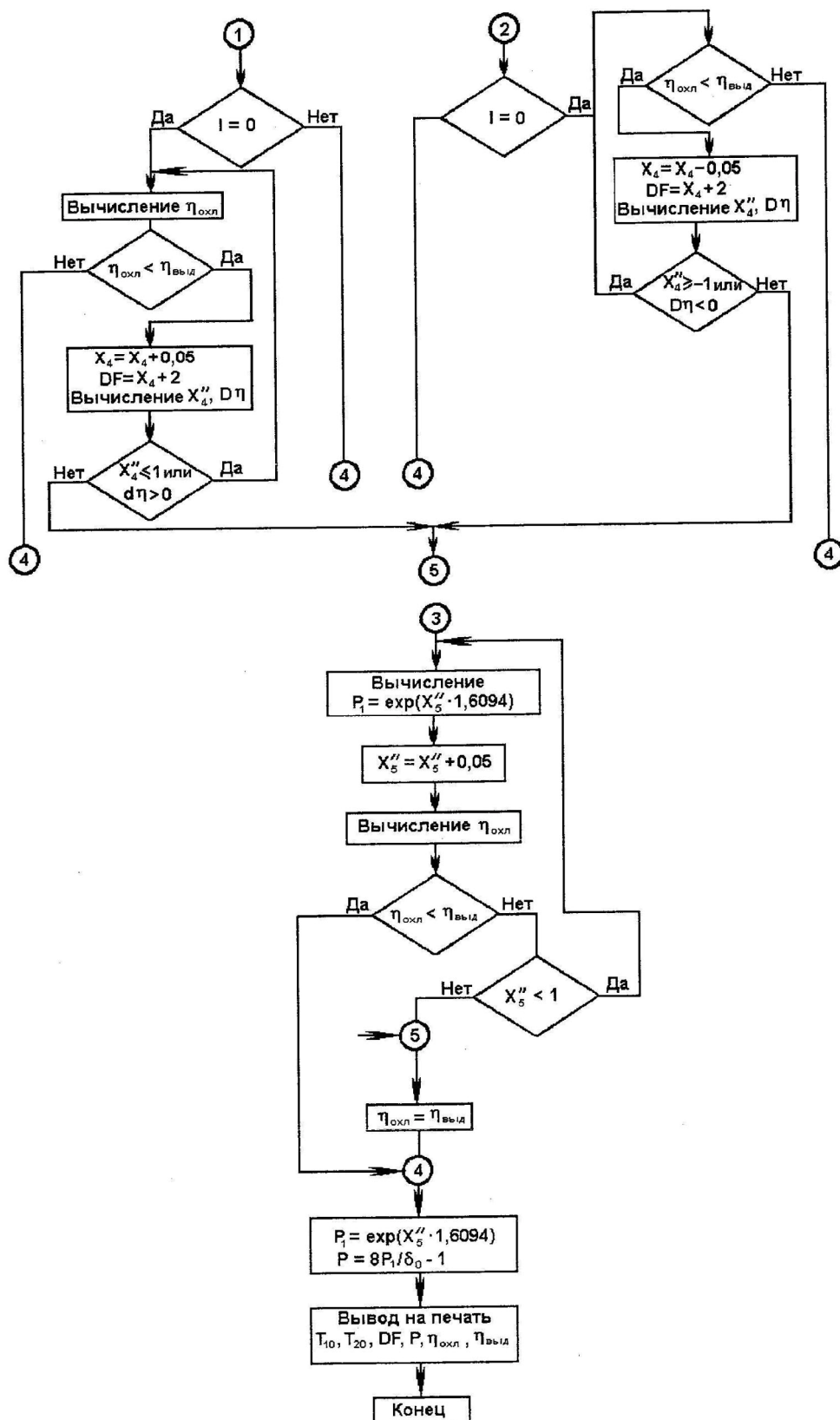


Рис. 33. Окончание

В промышленных установках чаще всего применяются 500-марочные тигли со средним значением $St = 1256 \text{ см}^2$. Диаметр металлопровода можно выбирать в пределах от 50 до 100 мм в зависимости от геометрических характеристик нижнего сечения отливки. Можно принять $Z_m = 0,8 \text{ м}$ и $l_0 = 0,4 \text{ м}$.

По запросу компьютера следует ввести необходимые геометрические характеристики отливки в зависимости от ее конфигурационного типа и типа принятой ЛПС.

После выполнения расчетов на дисплей компьютера выводятся технологические параметры (см. п. 8.1.9).

Логика блок-схемы программы соответствует рассмотренной выше последовательности технологических расчетов.

8.2. Эффективность применения системы автоматизированного расчета технологических параметров. Примеры расчетов

Эффективность применения системы была проверена при изготовлении 30 наименований отливок, охватывающих практически все применяемые при ЛВВ и ЛНД их типовые конфигурации. Результаты расчетов сравнивали с применяемыми на производстве технологическими параметрами, полученными в процессе длительной доводки технологии. В качестве иллюстрации рассмотрим приведенные ниже примеры для отливок различных конфигураций.

На рис. 11 изображен чертеж отливки «Рабочее колесо гидромурфты». Отливку можно представить как вытянутое в горизонтальном направлении цилиндрическое тело с отходящими от него в вертикальном направлении тонкими стенками лопаток. Отливку изготавливаем вакуумным всасыванием ($JJJ = 1$). Примем $Z_m = 0,8 \text{ м}$, $D_m = 8 \text{ см}$, $l_0 = 0,4 \text{ м}$. Тип отливки $II = 4$. Число участков $III = 2$; $to [1] = 2$; $to [2] = 1$; $Soh = 154 \text{ см}^2$, $dh = 60 \text{ мм}$, $mgo = 2 \text{ кг}$. Половина длины нижней части $l [1] = 70 \text{ мм}$, высота нижней части $h [1] = 13 \text{ мм}$, преобладающая толщина стенки нижней части $dd [1] = 13 \text{ мм}$, средняя площадь сечения нижней части $S [1] = 154 \text{ см}^2$. Высота верхней части $h [2] = 32 \text{ мм}$. Площадь сечения верхней части (суммарное сечение всех лопаток) $S [2] = 30 \text{ см}^2$. Толщина стенки лопатки $dd [2] = 1,8 \text{ мм}$. Отношение площади верхней части к площади нижней части $30/154 = 0,19 < 0,6$. Имеется резкое сужение потока, примем $III = 2$.

В результате применения системы автоматизированного расчета получаем следующие значения технологических параметров. Заливку формы следует проводить с переменным темпом изменения разрежения. Заполнение металлопровода и нижней части полости формы проводим при $\beta_m = \beta_n = 0,01 \text{ с}^{-1}$, а верхней тонкостенной части – при $\beta_v = 0,041 \text{ с}^{-1}$. Значения диаметров диафрагм соответственно составляют 2,5 и 4,9 мм при $\Delta P = 66640 \text{ Па}$. Время смены диафрагм равно 18,7 с для первой заливаемой отливки и 20,3 с для десятой отливки.

Применяем центральный подвод сплава из металлопровода ($JJ = 1$). Диаметр литника равен 62 мм, высота литника – 80 мм. Толщина покрытия в литнике – 0,4 мм краски на основе окиси цинка. Толщина покрытия на участке, оформляющем лопатки, – 0,2 мм, а в остальной части формы – 0,1 мм.

При данных параметрах обеспечивалось стабильное получение качественных отливок. При управлении с постоянным темпом создания разрежения качественную отливку получить не удалось. При малых значениях коэффициента β возникали недоливы лопаток, а при больших – газовые несплошности и спаи, вызванные колебаниями уровня сплава. Для получения качественных отливок пришлось за счет технологических напусков вдвое увеличить толщину лопаток.

На рис. 34 приведен чертеж отливки «Корпус». Отливка изготавлиется литьем под низким давлением ($JJJ = 3$). $D_m = 8 \text{ см}$, $Z_m = 0,8 \text{ м}$, $l_0 = 0,4 \text{ м}$, $S_m = 1256 \text{ см}^2$. Отливка имеет сложную конфигурацию. Примем индекс типа отливки $II = 5$. Площадь отливки в зоне подвода литника $SOH = 79 \text{ см}^2$. Толщина стенки отливки в зоне подвода $dh = 100 \text{ мм}$. Преобладающая толщина стенки отливки $dp = 15 \text{ мм}$. Масса отливки – 11 кг. Высота отливки $ho = 325 \text{ мм}$. Максимальная площадь сечения $SOM = 90 \text{ см}^2$. Участков резкого сужения сечений нет ($III = 1$). Применяем нижний подвод сплава через цилиндрический литник из металлопровода ($JJ = 1$).

В результате машинного расчета получаем следующие значения технологических параметров. Заполнение формы проводим при постоянном темпе изменения избыточного давления $m_\phi = 602 \text{ Па/с}$. Время заливки – 15,4 с. По расчету диаметр литника – 62 мм. Высота литниковой втулки – 79 мм. Толщина асбестового покрытия в литнике – 0,5 мм. На практике по действующей технологии диаметр литника – 89 мм. Расчет показывает, что при данном диаметре можно применять кокильное покрытие в литнике на основе окиси

цинка с толщиной слоя 0,3 мм при любой высоте литника (на практике принято 15 мм), так как диаметр литника больше диаметра металлопровода.

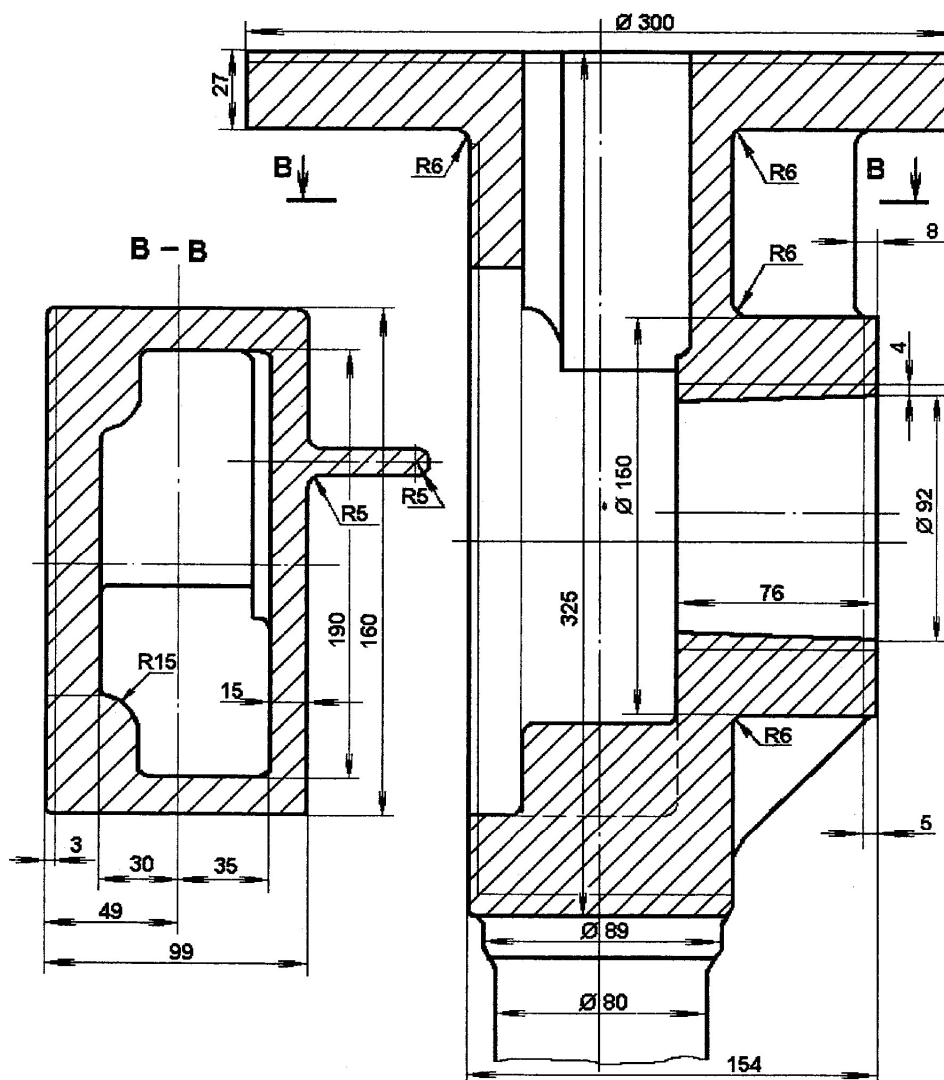


Рис. 34. Отливка «Корпус»

На рис. 35 приведен чертеж отливки «Основание». Отливку изготавливаем под низким давлением ($JJJ = 3$). Примем $D_m = 9$ см, $Z_m = 0,8$ м, $l_0 = 0,4$ м. Отливка представляет собой комбинацию двух полых цилиндрических тел: нижнего и тонкостенного верхнего. Таким образом, индекс типа отливки $II = 3$. При этом индекс типа нижней части $to [1] = 3$, индекс типа верхней части $to [2] = 3$. Площадь сечения нижней части отливки $S [1] = 3,14 \cdot (46,2^2 - 36,2^2)/4 = 645 \text{ см}^2$. Высота нижней части отливки $h [1] = 20$ мм. Толщина стенки нижней части отливки $dd [1] = 50$ мм. Площадь сечения верхней части отливки $S [2] = 3,14 \cdot (46,62^2 - 44,62^2)/4 = 143 \text{ см}^2$. Высота верхней части отливки

$h [2] = 205$ мм. Толщина стенки верхней части отливки (преобладающая) $dd [2] = 10$ мм. Площадь сечения отливки в зоне подвода сплава $S_{oh} = 645 \text{ см}^2$. Толщина стенки отливки в зоне подвода сплава $dh = 50$ мм. Периметр отливки в зоне подвода сплава $LOT = 3,14 \cdot (36,2 + 462)/2 = 1294$ мм. Приведенная толщина стенки отливки в зоне подвода сплава $rot = 645 \cdot 2/(645 + (645 - 143) + 3,14 \cdot 2 \cdot (36,2 + 462)) = 0,8 \text{ см} = 8$ мм. Масса отливки – 34 кг. Отливка нетехнологичная, так как в ее верхней части имеются утолщенные фланцы, поэтому на них необходимо установить прибыли. Отношение площадей $S [2]/S [1] = 143/655 = 0,22 < 0,6$. Имеется резкое сужение сечений. Число участков, разделенных резким сужением, равно двум ($III = 2$). Число заливаемых отливок из тигля – 3. Тип литниковой системы $JJ = 2$ (нижний рассредоточенный подвод).

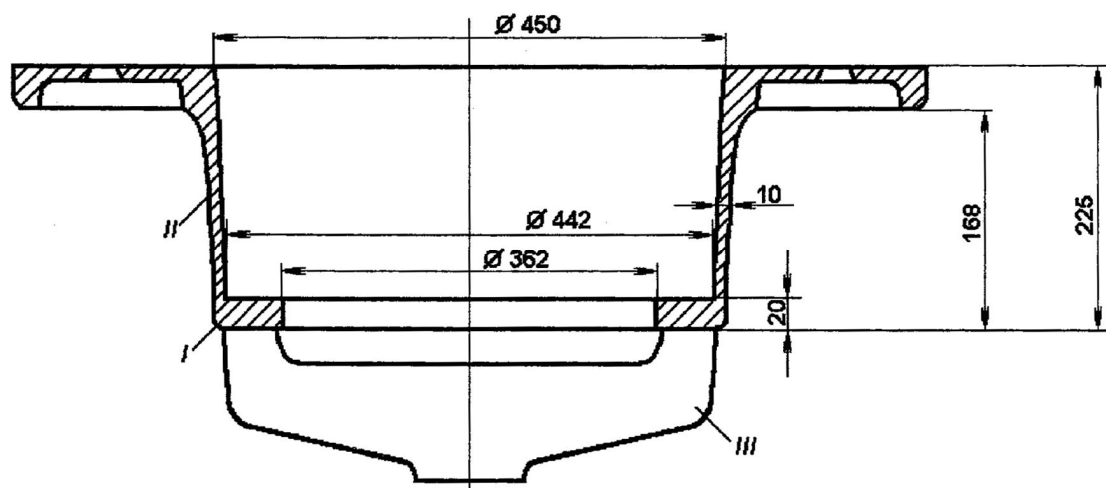


Рис. 35. Отливка «Основание»:

I, II, III – участки отливки

После ввода исходных данных в результате машинного расчета получаем следующие значения технологических параметров. Время заливки тонкостенного элемента – 3,7 с. Начальный темп нарастания избыточного давления – 435 Па/с. После заполнения металлопровода и нижнего участка полости формы темп нарастания избыточного давления изменяется до 1634 Па/с. Время переключения темпов равно 25,6 с при первой заливке, 32,9 с – при второй и 40,2 с – при третьей. Расчетное значение размеров сечения питателя: толщина питателя – 50 мм, ширина – 73 мм, число питателей – 5. Толщина кокильного покрытия на основе окиси цинка для полости формы и литниковой системы равна 0,1 мм. Температура нагрева формы перед заливкой – 200 °С.

Эмпирически подобранные при доводке технологии на предприятии «Уралтрансмаш» размеры питателей имели следующие значения: толщина

питателя – 50 мм, ширина – 80 мм; число питателей – 4. Это соответствует суммарной зоне действия питателей 240 мм, что равно 30 приведенным толщинам отливки (при $ROT = 8$ мм). Как показали наши исследования, значения пористости не превышают 1–1,5 % в условиях ЛРД, если расстояние между питателями не более $(20 \div 22) ROT$. При расстоянии, равном 30 ROT , явные усадочные явления не возникают, но наблюдаются более высокие значения пористости. Сравнение показывает, что расчетные и фактические размеры питателей практически совпадают.

На рис. 36 приведен чертеж отливки «Крыльчатка». Отливка представляет собой ступицу (полый цилиндр) с отходящими от нее восемью лопатками со средней толщиной стенки 10 мм. Заполняемость формы лимитирует заполнение лопаток. Несмотря на наклон лопаток, можно считать, что отливка относится к типу вертикальной плиты (индекс типа $II = 1$).

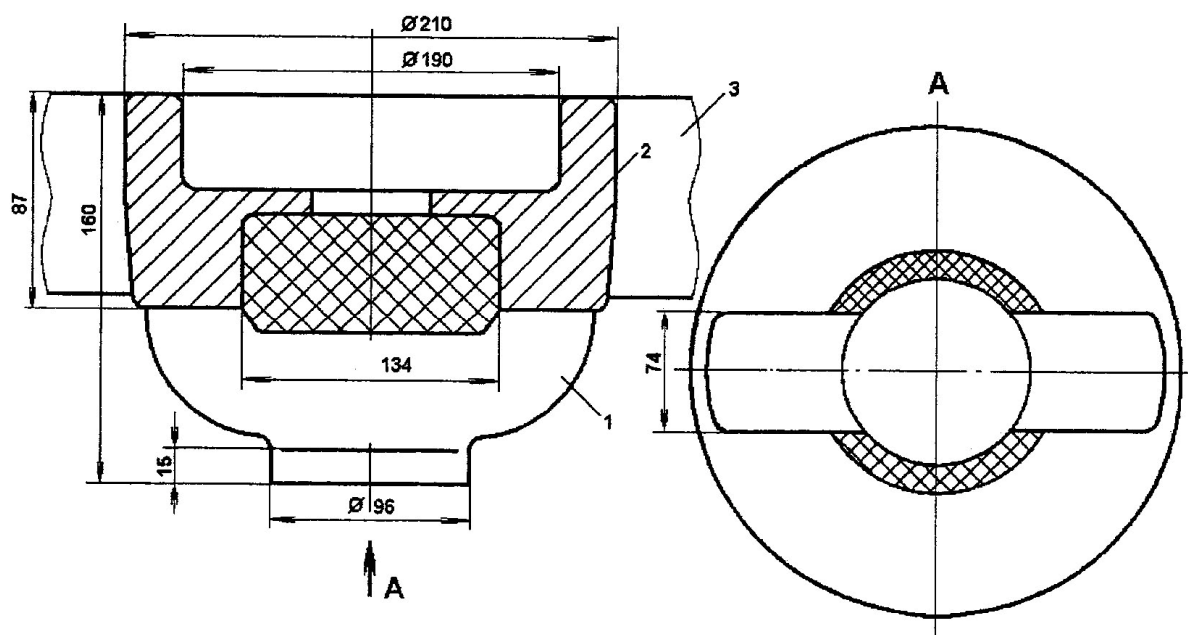


Рис. 36. Отливка «Крыльчатка»:

1 – литниковая система; 2 – ступица; 3 – лопатки

Площадь отливки внизу $S_{oh} = 205 \text{ см}^2$. Толщина стенки в месте подвода $dh = 38$ мм. Приведенная толщина стенки отливки в месте подвода питателей $rot = 10,7$ мм. Высота отливки $HO = 87$ мм. Преобладающая толщина стенки $dp = 10$ мм. Масса отливки – 11,9 кг. Максимальная площадь $SOM = 409 \text{ см}^2$. Периметр отливки в месте подвода сплава $LOT = 556$ мм. Расчет ведем на 5 заливаемых отливок ($ns = 5$). Применяем нижний расщедоточенный подвод сплава ($JJ = 2$). Отливку изготавливаем литьем под

низким давлением при автоматическом регулировании темпа изменения избыточного давления ($III = 3$). Величины D_m , Z_m и l_0 соответствуют условиям предыдущих примеров; $III = 1$.

В результате машинного расчета получены следующие значения технологических параметров. Заполнение металлопровода и формы проводится при различных темпах изменения перепада давлений на расплав. Заполнение металлопровода осуществляется при темпе $mt = 686$ Па/с, а заполнение полости формы – при темпе $mf = 699$ Па/с. Можно проводить заполнение при одном темпе, равном 700 Па/с. Толщина литника равна 38 мм, ширина – 74 мм. Число питателей – 2. Толщина кокильного покрытия в питателях (краска на основе окиси цинка) – 0,4 мм.

В УралНИТИ эмпирически установлены следующие параметры литников: толщина – 38 мм, ширина – 60 мм. При данных параметрах качественное питание отливки (пористость не ниже 1,5 %) обеспечивается при толщине теплоизоляционного покрытия в питателе, равной 0,6 мм (краска на основе окиси цинка) или 0,4 мм (асбестовая краска).

На рис. 37 приведен чертеж отливки «Головка». Отливку можно рассматривать как комбинацию тел, представляющих собой полые цилиндры, т. е. тип отливки имеет индекс $II = 3$. Площадь сечения отливки по высоте дискретно уменьшается. При переходе к тонкостенной части имеет место сужение сечения. Отношение площади сечения тонкостенного элемента $S [3] = 138 \text{ см}^2$ к площади нижележащего элемента $S [2] = 290 \text{ см}^2$ равно 0,47, т. е. меньше 0,6. Отношение площади $S [2]$ к площади нижнего элемента $S [1] = 560 \text{ см}^2$ равно 0,52, т. е. тоже меньше 0,6. Поэтому число элементов, разделенных участками резкого сужения потоков, равно трем: $III = 3$ (элементы 1, 2 и 3). Площадь нижнего сечения отливки $S_{oh} = 560 \text{ см}^2$. Толщина стенки отливки в месте подвода сплава $dh = 44$ мм. Высота отливки в месте подвода сплава $hh = 26$ мм. Периметр отливки в месте подвода сплава $LOT = 3,14 \cdot (350 + 438)/2 = 1237$ мм. Масса отливки – 34,5 кг. Приведенная толщина стенки отливки в зоне подвода сплава $rot = 11$ мм. Площадь сечения нижнего элемента $S [1] = 560 \text{ см}^2$. Его высота $h [1] = 26$ мм. Толщина стенки нижнего элемента $dd [1] = 44$ мм. Площадь сечения среднего элемента $S [2] = 290 \text{ см}^2$. Высота среднего элемента $h [2] = 39$ мм. Толщина его стенки $dd [2] = 22$ мм. Площадь сечения верхнего элемента $S [3] = 138 \text{ см}^2$. Его высота $h [3] = 213$ мм. Толщина стенки верхнего элемента $dd [3] = 10$ мм.

Заливку ведем под низким давлением с автоматическим управлением темпом изменения перепада давлений ($JJJ = 3$). Диаметр металлопровода $D_m = 90$ мм. Длина металлопровода $Z_m = 0,8$ м. Начальное заглубление металлопровода в расплав $l_0 = 0,4$ м. Площадь зеркала расплава в тигле $S_m = 1256$ см². Тип применяемой литниковой системы $JJ = 3$ (боковой рассредоточенный подвод).

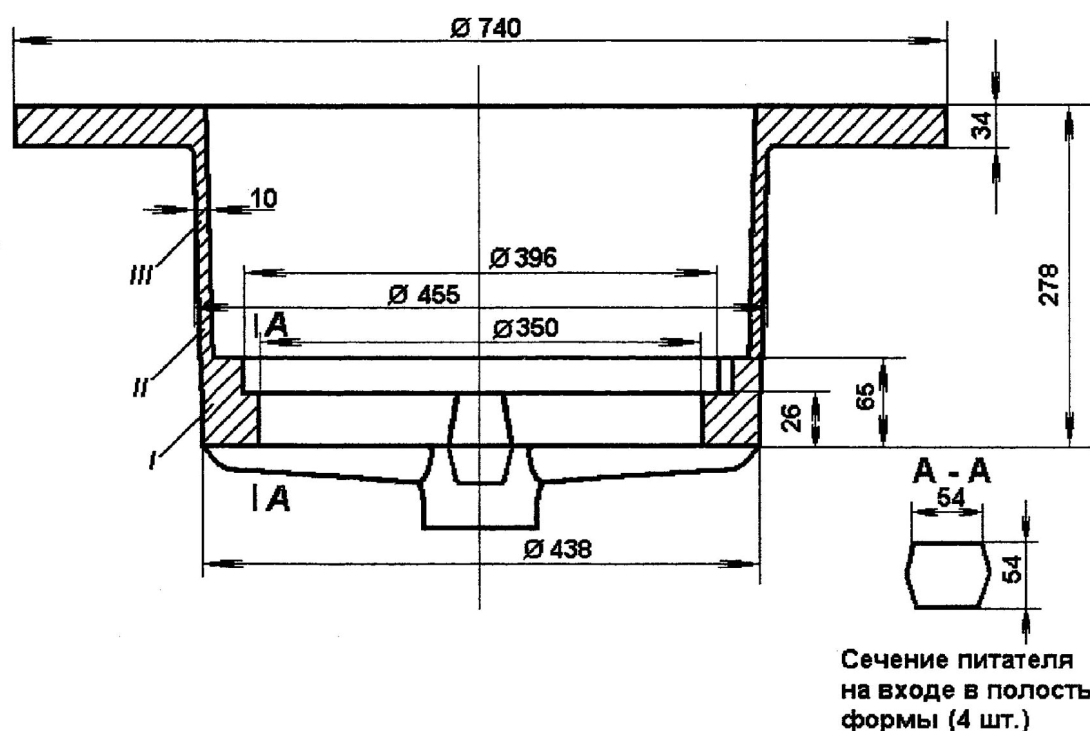


Рис. 37. Отливка «Головка»:

I, II, III – участки отливки

После машинного расчета получены следующие технологические параметры. Время заливки тонкостенной части отливки – 4,2 с. Заполнение металлопровода и нижней части полости формы осуществляется при темпе нарастания избыточного давления $mf[1] = 615$ Па/с, средний элемент формы заполняется при темпе 990 Па/с, а тонкостенный участок – при темпе 1732 Па/с. Переключение темпа проводится соответственно через 16,1 и 17,2 с при первой заливке и через 25,3 и 26,4 с – при третьей. Размеры питателей: толщина – 33 мм, ширина – 66 мм. Число питателей – 4. Стенки питателей нужно покрыть кокильной краской на основе асбеста с толщиной слоя 1 мм. Толщина покрытия в полости формы – 0,1 мм. Размеры питателей и их число практически совпадают с полученными в результате длительной производственной доводки технологии данными.

На рис. 38 приведен чертеж отливки «Цилиндр». Как видно из чертежа, отливка относится к типу «полый цилиндр» ($II = 3$). На расстоянии 60 мм от низа отливки имеется бобышка, которая создает термический узел. Поэтому подвод сплава необходимо осуществлять в эту бобышку через питатель из стояка, соединенного с металлопроводом ($JJ = 5$). Высота отливки $HO = 160$ мм, преобладающая толщина стенки – 10 мм, максимальная площадь сечения отливки в нижнем сечении $S_{oh} = 74 \text{ см}^2$, толщина стенки в нижней части $dh = 12,5$ мм. Масса отливки – 3,5 кг. Приведенная толщина стенки в термическом узле $rot = 6,5$ мм, высота термического узла – 30 мм, высота стояка до центра питателя – 60 мм. Отливку заливали под низким давлением ($JJJ = 3$).

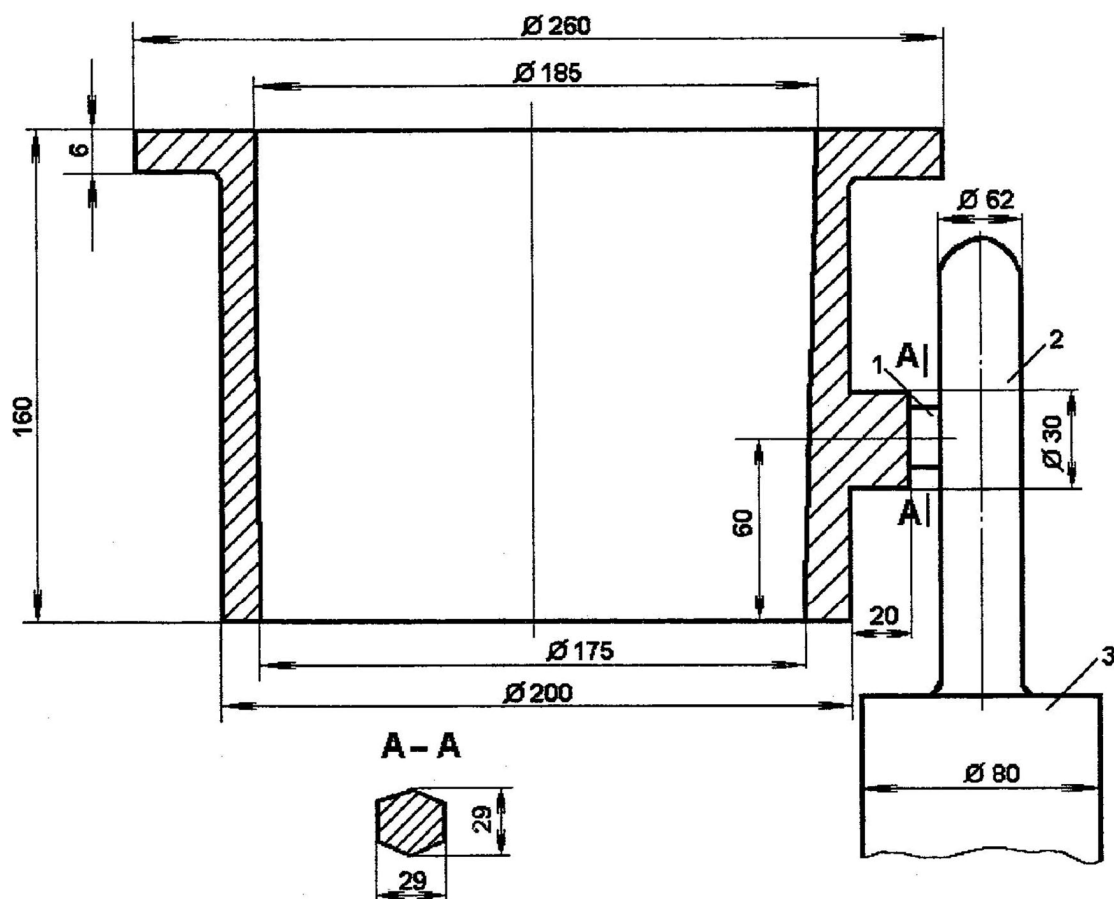


Рис. 38. Отливка «Цилиндр»:

1 – питатель; 2 – стояк; 3 – металлопровод

Машинный расчет позволил получить следующие значения технологических параметров. Время заливки – 4,2 с. Темп изменения избыточного давления $mf = 716 \text{ Па/с}$. Толщина питателя – 30 мм, ширина – 49 мм. Диаметр стояка – 70 мм. Толщина кокильного покрытия (краска на основе оки-

си цинка) в питателе и стояке – 0,1 мм. Фактическое время заливки при данных параметрах составило 5 с. Отливки получены качественные, без усадочных дефектов.

На рис. 39 приведен чертеж отливки «Корпус» (индекс типа отливки $II = 3$). В отливке в нижнем и верхнем сечениях имеются два термических узла (1 и 2). Отливка изготавливается под низким давлением ($JJJ = 3$). Для обеспечения питания термических узлов применяется ЛПС с подводом сплава на двух уровнях ($JJ = 6$). Высота отливки – 300 мм, площадь в нижнем сечении – 287 см^2 , преобладающая площадь сечения – 111 см^2 . Приведенная толщина стенки нижнего термического узла $rot1 = 11 \text{ мм}$, верхнего узла – $rot2 = 11 \text{ мм}$. Высота нижнего термического узла $ht1 = 40 \text{ мм}$, верхнего узла – $ht2 = 40 \text{ мм}$. Ширина отливки $ly = 240 \text{ мм}$. Ширина нижнего термического узла $bt1 = 240 \text{ мм}$, верхнего узла – $bt2 = 40 \text{ мм}$. Масса отливки – 12,7 кг. Преобладающая толщина стенки $dp = 15 \text{ мм}$.

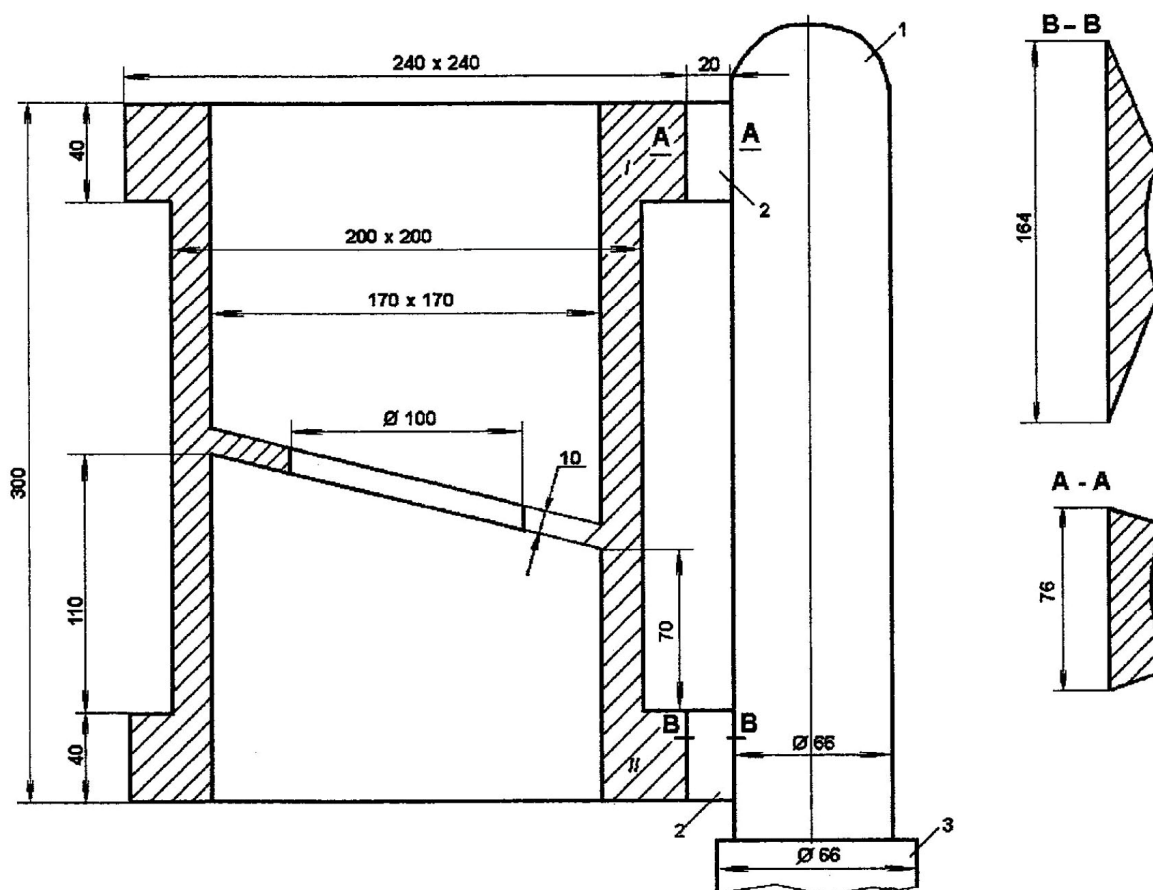


Рис. 39. Отливка «Корпус»:

1 – стояк; 2 – питатели; 3 – металлопровод

После машинного расчета получены следующие технологические параметры. Темп изменения избыточного давления при заполнении метал-

лопровода и полости формы $mf = 2000 \text{ Па/с}$. Толщина верхнего питателя – 40 мм, ширина верхнего питателя в месте подвода сплава – 77 мм. Толщина нижнего питателя – 40 мм, ширина нижнего питателя в месте подвода сплава – 116 мм. Диаметр стояка – 66 мм, диаметр металлопровода – 80 мм. Толщина кокильного покрытия в питателе и стояке – 0,2 мм (краска на основе окиси цинка).

На рис. 40 приведен чертеж отливки «Форма для выпечки кексов». Отливка представляет собой тонкостенный полый цилиндр ($II = 3$). Участков резкого сужения потока нет ($III = 1$). Площадь нижнего сечения отливки $SOH = 4,3 \text{ см}^2$. Диаметр окружности, вписанной в нижнее сечение, $dh = 4,9 \text{ мм}$. Высота отливки $HO = 115 \text{ мм}$. Преобладающая толщина стенки – 3 мм. Максимальная площадь сечения $SOM = 5,4 \text{ см}^2$. Масса отливки – 0,14 кг. Приведенная толщина стенки – 1,5 мм. Объем камеры $V_k = 0,07 \text{ м}^3$. Площадь зеркала сплава в тигле – 1256 см^2 . Диаметр металлопровода – 40 мм, длина $Z_m = 0,8 \text{ м}$. Начальное заглубление металлопровода в расплав $l_0 = 0,4 \text{ м}$. Начальная температура формы $T_{20} = 200 \text{ °C}$. Отливку изготавливаем вакуумным всасыванием ($JJJ = 1$), применяем вертикально-щелевую систему ($JJ = 7$).

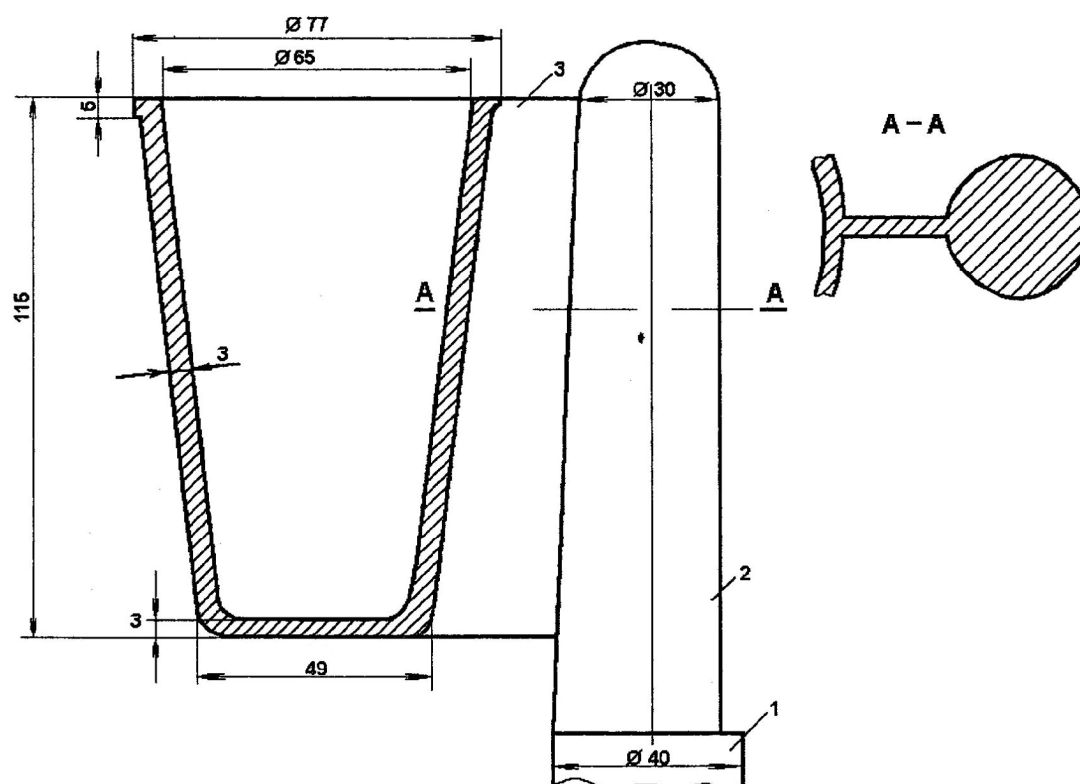


Рис. 40. Форма для выпечки кексов:

1 – металлопровод; 2 – стояк; 3 – щель

Машинный расчет позволил получить следующие значения технологических параметров. Время заливки – 0,6 с. Газодинамический коэффициент $\beta = 0,023 \text{ с}^{-1}$. Диаметр диафрагмы в вакуумной сети – 3,3 мм. Ширина щели $b = 2,8 \text{ мм}$, ее высота – 115 мм. Высота стояка – 130 мм, диаметр стояка – 31 мм. Толщина покрытия в питателе и стояке – 0,15 мм (асбестовая краска). Толщина покрытия в форме – 0,2 мм.

Фактическое время заливки составило 0,7 с. При данных размерах ЛПС и условиях заливки стабильно обеспечивалось получение качественных отливок. После затвердевания отливки и снятия металлопровода сплав из металлопровода полностью сливался в тигель, что обеспечивало высокий выход годного.

Заключение

В монографии изложены основные сведения о технологических особенностях основных разновидностей литья под регулируемым газовым давлением, освещены результаты исследований процессов, происходящих при формировании отливок, установлены основные технологические параметры и приведены методы их определения, рассмотрен комплекс вопросов по организации и расчету процессов питания отливок.

Монография направлена на развитие у студентов и специалистов навыков проектирования технологии и конструирования литниковых систем для отливок, изготавливаемых литьем под регулируемым газовым давлением, в производственном и учебном процессе, на повышение эффективности проведения практических занятий по дисциплине «Технология литейного производства». В работе содержатся сведения, необходимые для решения технологических вопросов и выполнения расчетов.

При изложении материала основное внимание уделено освещению научных основ процессов, происходящих при заполнении форм и формировании отливок, а также современным методам их количественного описания.

Теоретические вопросы тесно связаны с процессами, происходящими в непрерывно развивающейся отрасли прикладной науки. Особое внимание в монографии уделено автоматизации технологических расчетов и описанию разработанной компьютерной программы. Даны методические указания по практическому использованию компьютерной программы при определении технологических параметров изготовления отливок, приведены примеры технологических расчетов для основных типов отливок. Рассмотрено большое количество возможных литниково-питающих систем и их автоматическое проектирование.

Библиографический список

1. *Борисов Г. П.* Некоторые особенности процесса литья под регулируемым давлением / Г. П. Борисов; Акад. наук УССР, Ин-т пробл. литья. Киев, 1967.
2. *Дубицкий Г. М.* Литниковые системы / Г. М. Дубицкий. Москва: Машгиз, 1962. 256 с.
3. *Отливки* из алюминиевых сплавов. Типовой технологический процесс литья под низким давлением: РТМ 2–1109–77. Москва, 1978. 77 с.
4. *Специальные* способы литья: справочник / В. А. Ефимов [и др.]; под общ. ред. В. А. Ефимова. Москва: Машиностроение, 1991. 734 с.
5. *Теория* и технология методов литья под регулируемым газовым давлением / Б. С. Чуркин [и др.] / Свердл. инж.-пед. ин-т. Свердловск, 1990. 203 с.
6. *Чуркин А. Б.* Организация питания отливок при литье под регулируемым давлением / А. Б. Чуркин // Литейное производство. 2003. № 11. С. 12–15.
7. *Чуркин А. Б.* Система автоматизированных расчетов технологических параметров при литье под регулируемым давлением / А. Б. Чуркин // Литейное производство. 2002. № 7. С. 27–29.
8. *Чуркин А. Б.* Эффективность применения автоматизированной системы расчетов технологических параметров изготовления отливок при литье под регулируемым давлением / А. Б. Чуркин // Литейщик России. 2003. № 9. С. 32–33.

ТИПЫ ОТЛИВОК

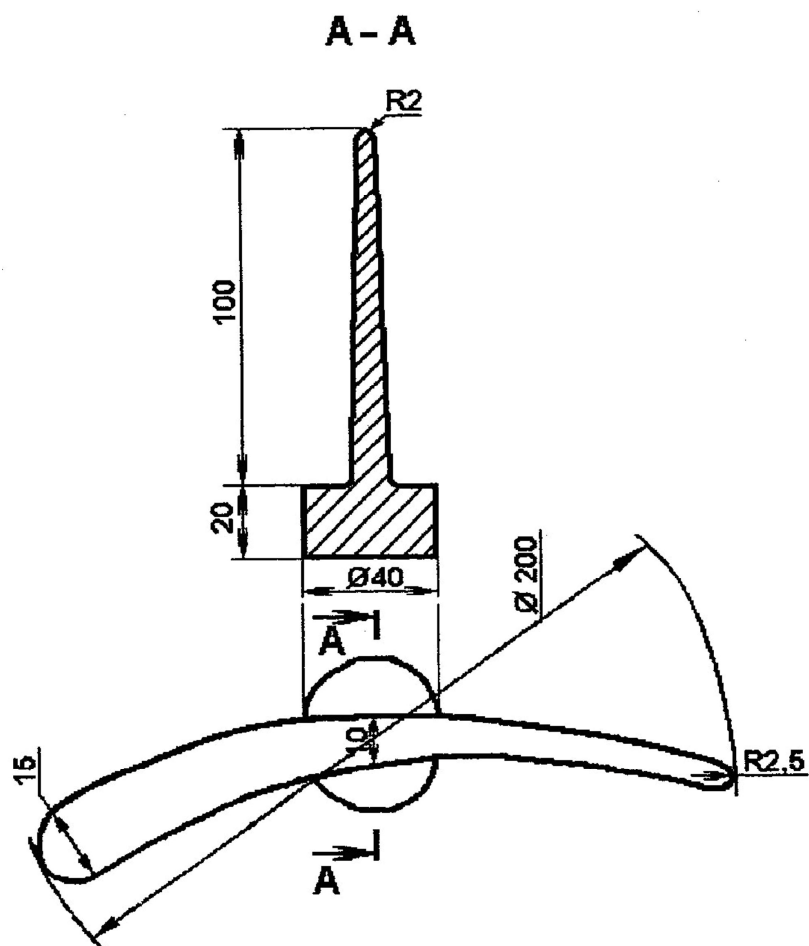
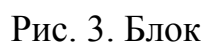
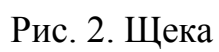


Рис. 1. Лопатка



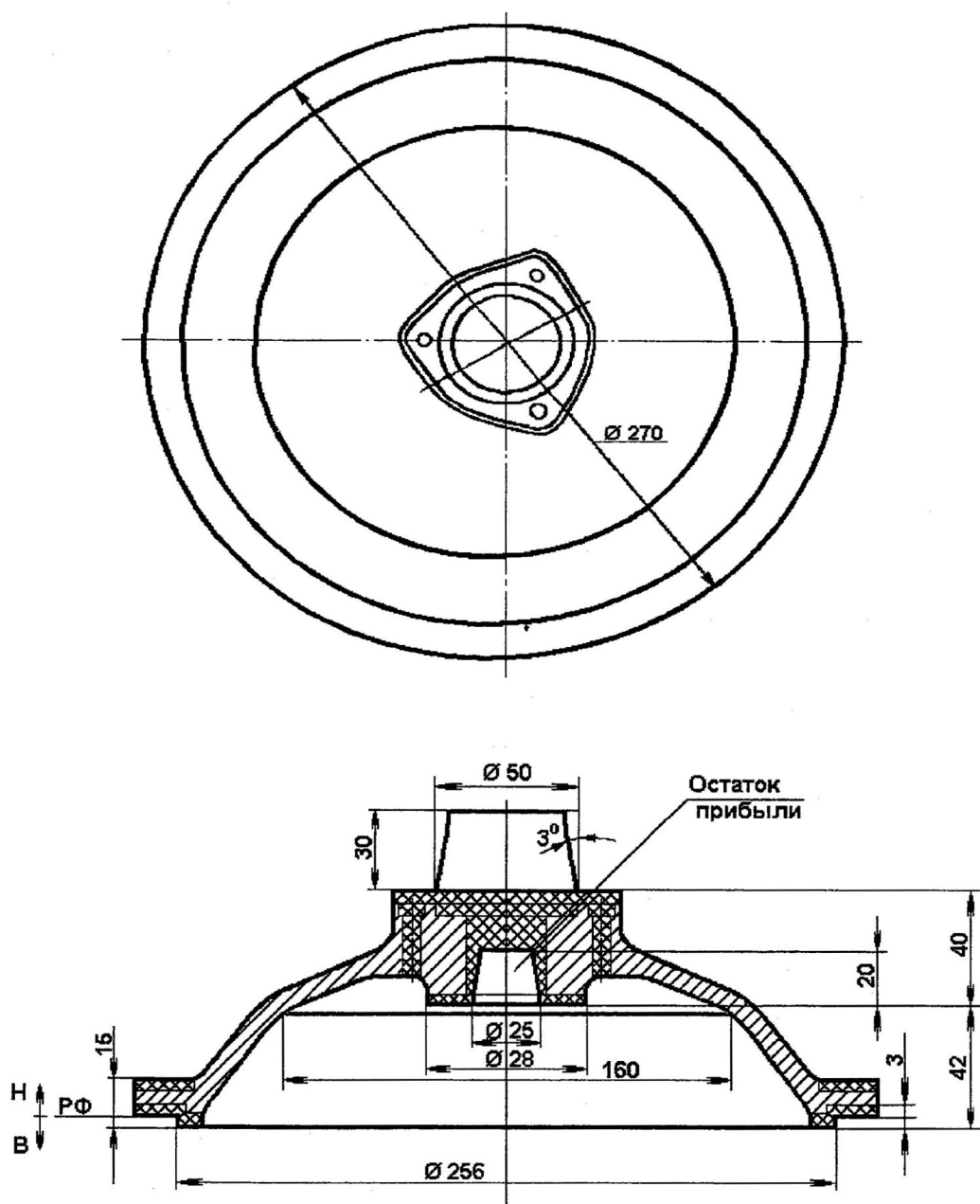


Рис. 4. Крышка спидометра

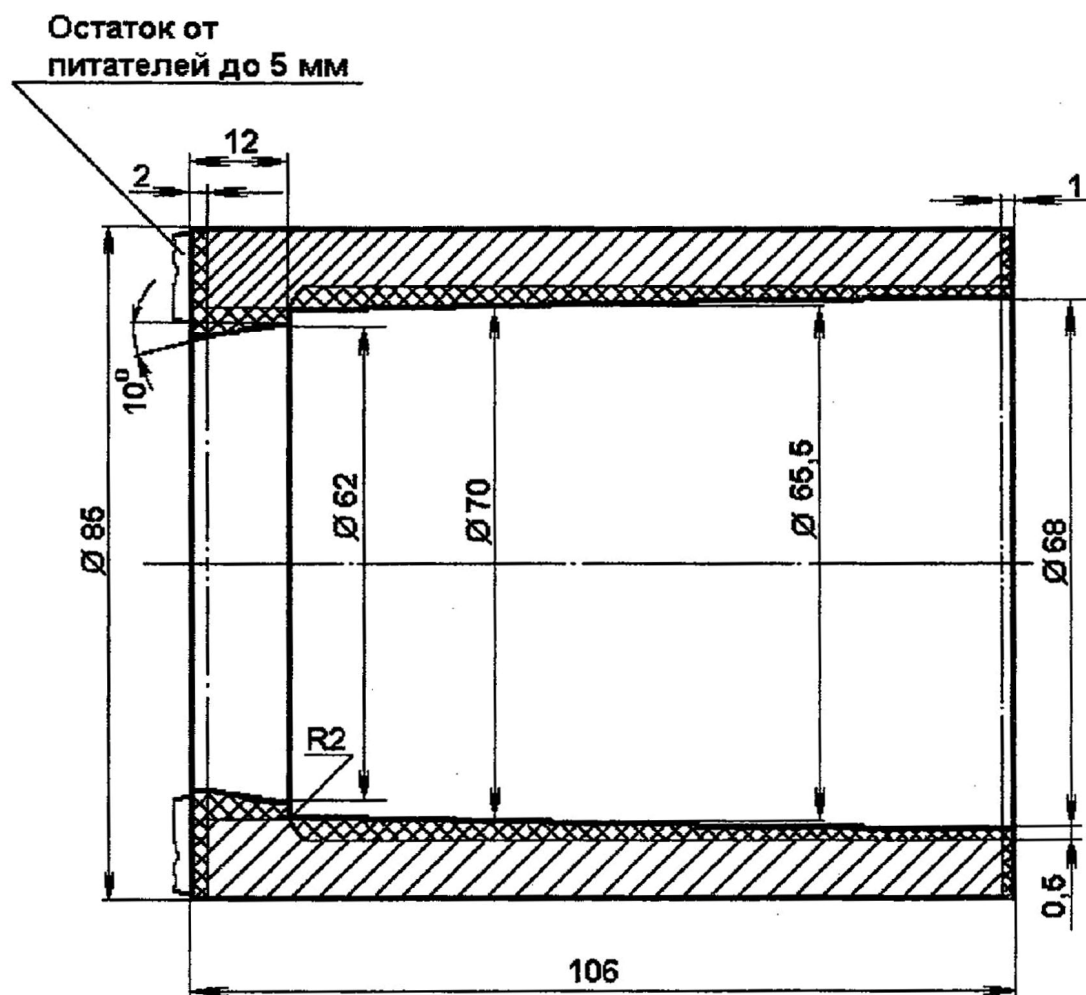


Рис. 5. Втулка распорная

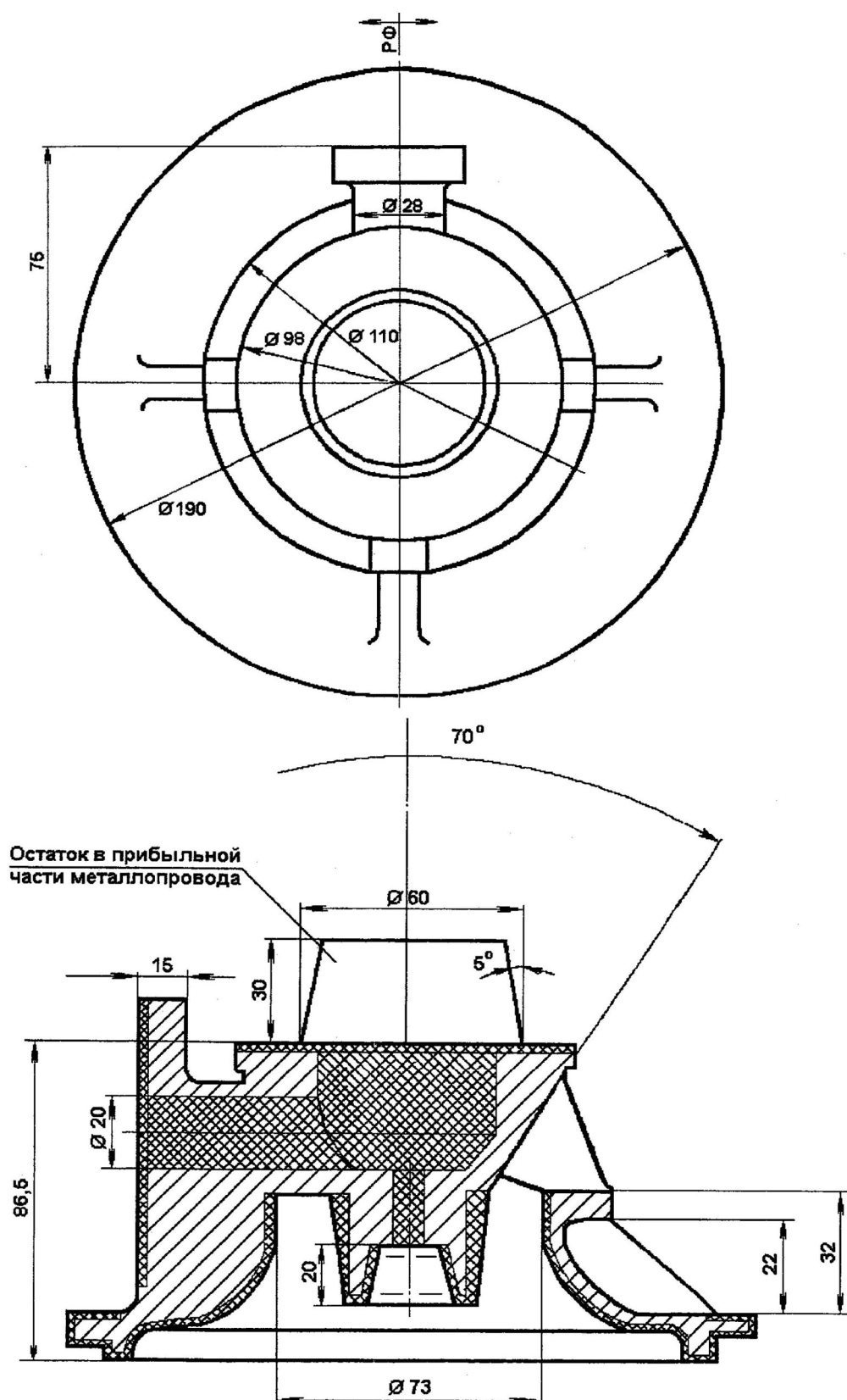
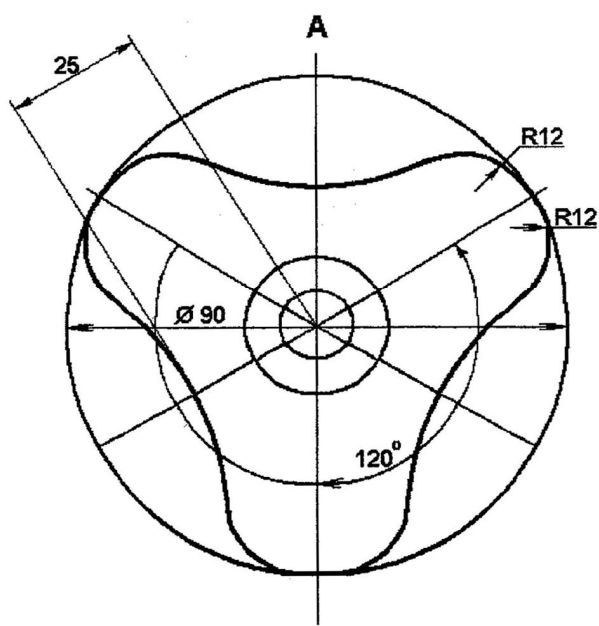


Рис. 6. Патрубок



101

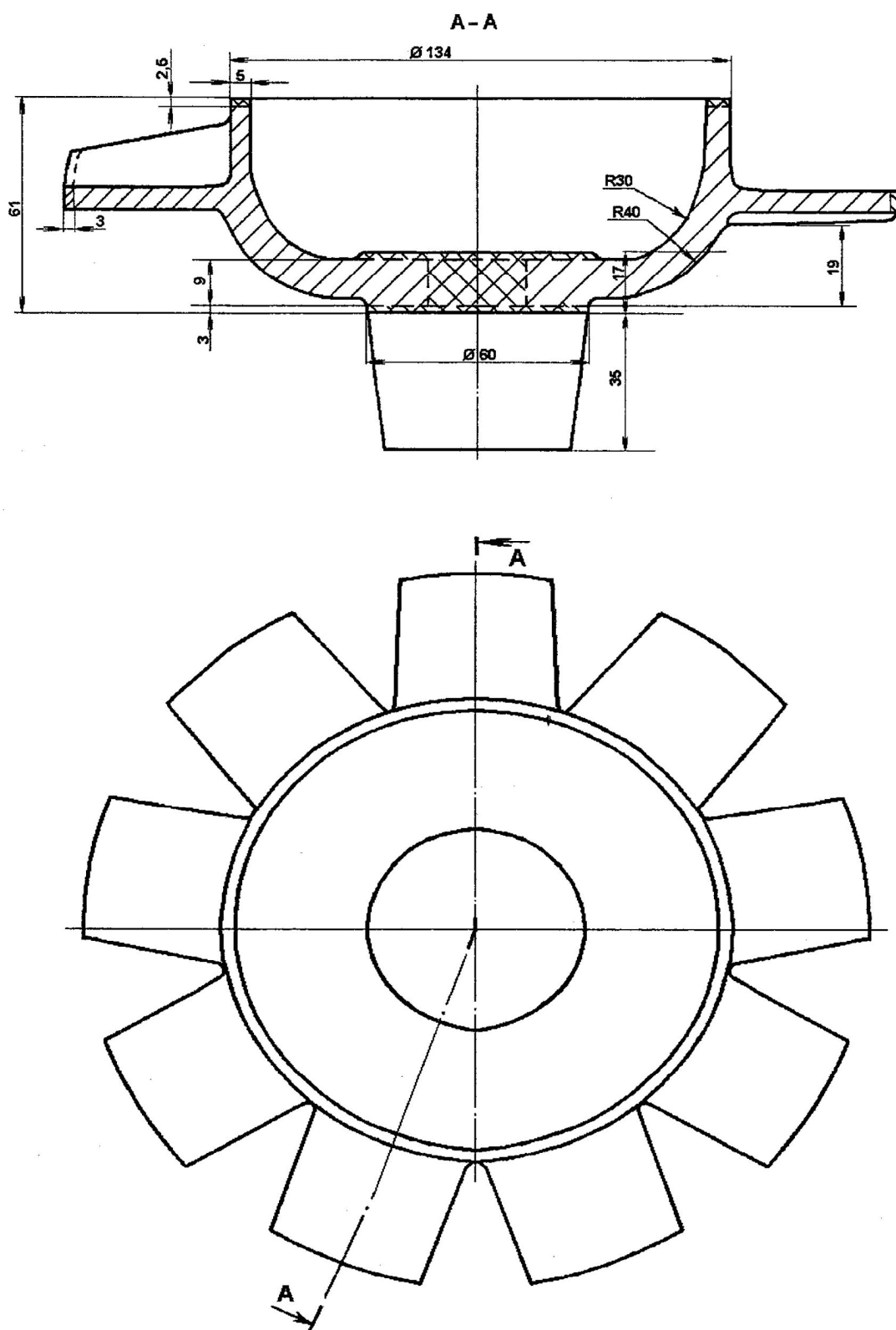


Рис. 8. Крыльчатка

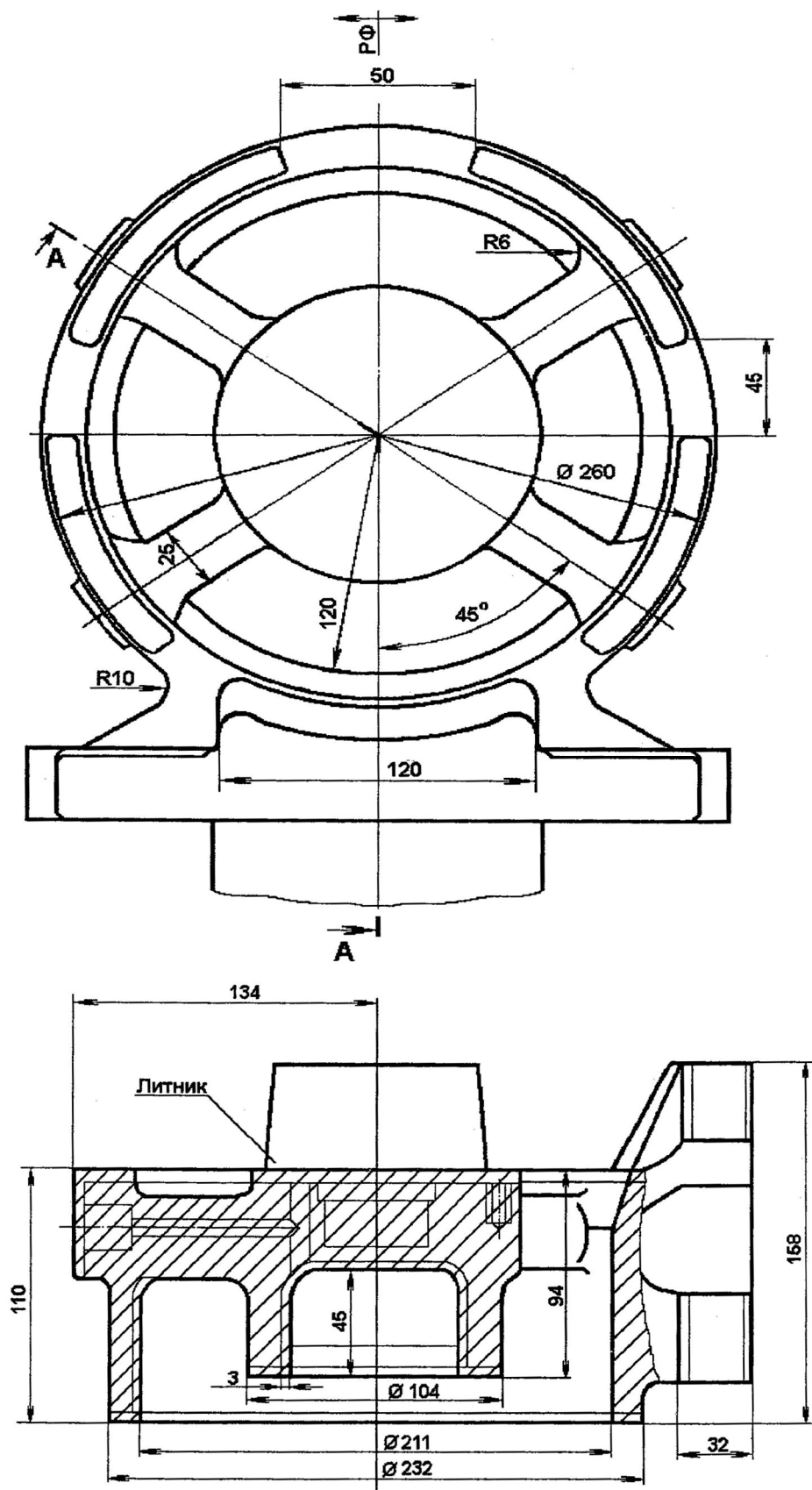


Рис. 9. Корпус

Научное издание

Категоренко Юрий Иванович

Чуркин Борис Сергеевич

Чуркин Алексей Борисович

Ведерников Максим Вячеславович

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА РАСЧЕТА
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ЛИТЬЕ
ПОД РЕГУЛИРУЕМЫМ ДАВЛЕНИЕМ

Монография

Редакторы Е. А. Ушакова, Н. М. Юркова

Компьютерная верстка Н. А. Ушениной

Печатается по постановлению
редакционно-издательского совета университета

Подписано в печать 09.10.13. Формат 60×84/16. Бумага для множ. аппаратов.
Печать плоская. Усл. печ. л. 6,0. Уч.-изд. л. 6,2. Тираж 500 экз. Заказ № _____.
Издательство Российского государственного профессионально-педагогического университета. Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11.
